

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Karlo Tandarić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Karlo Tandarić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Karlo Tandarić

ZAHVALA

Iskreno zahvaljujem svom mentoru doc. dr. sc. Ivici Garašiću na korisnim savjetima, pruženoj podršci i primjedbama tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem dr. sc. Tanji Tomić na svim savjetima, kritikama i primjedbama koje su oblikovale ovaj rad.

Također, zahvaljujem svim kolegama koji su mi pomogli tijekom studija.

I na kraju se zahvaljujem obitelji na ukazanom povjerenju i strpljivosti tijekom studiranja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **KARLO TANDARIĆ**

Mat. br.: **0035189514**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **METODE PROCJENE ZAVARLJIVOSTI ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **WELDABILITY ASSESSMENT METHODS OF HIGH STRENGTH STEELS**

Opis zadatka:

Na osnovu literature proučiti zavarljivost čelika i detaljno analizirati uzročno-posljedične mehanizme nastanka pukotina u zoni zavarenog spoja. Dati prikaz razvoja čelika visoke čvrstoće kao i glavne probleme sa stanovišta zavarljivosti uzimajući u obzir način proizvodnje čelika kao i tehnologiju zavarivanja. Opisati različite metode ispitivanja zavarljivosti za nekoliko različitih kriterija a posebno izdvojiti načine izračuna i interpretacije ekvivalenta ugljika.

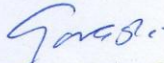
U eksperimentalnom dijelu odabrati odgovarajuću vrstu čelika te za zadani kemijski sastav i debljinu materijala odrediti zavarljivost uz primjenu više metoda ekvivalenta ugljika. Pretpostaviti različite opcije postupaka zavarivanja i unosa topline te načiniti komparativnu analizu različitih pristupa. U zaključku komentirati dobivena rješenja i predložiti optimalnu metodologiju za primjenu u praksi.

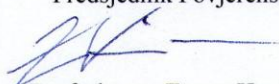
Zadatak zadan:
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:
1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
POPIS KRATICA.....	VI
SAŽETAK RADA.....	VII
1.UVOD.....	1
2. ČELICI POVIŠENE ČVRSTOĆE.....	2
2.1. Općenito o čelicima povišene čvrstoće.....	2
2.2. Mehanizmi očvrstnuća.....	3
2.2.1. Očvrstnuće kristalima mješancima.....	4
2.2.2. Očvrstnuće martenzitnom transformacijom.....	4
2.2.3. Očvrstnuće hladnom deformacijom.....	5
2.2.4. Očvrstnuće granicama zrna (usitnjenjem zrna).....	5
2.2.5. Očvrstnuće izlučivanje (precipitacijom i disperzijom faza).....	6
2.3. Proizvodnja čelika povišene čvrstoće.....	6
2.4. Prikaz razvoja čelika visoke čvrstoće.....	8
2.5. Dijagram σ - ϵ za čelike visoke čvrstoće.....	10
3. ZAVARLJIVOST ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE.....	11
3.1. Metalurško stajalište zavarljivosti čelika.....	13
3.1.1. Metalurgija zavarivanja.....	13
3.1.2. Metalurgija zone taljenja.....	14
3.1.3. Metalurgija zone utjecaja topline.....	15
3.2. Konstrukcijsko stajalište zavarljivosti čelika.....	17
3.3. Tehnološko stajalište zavarljivosti čelika (izvedbeno stajalište).....	20
4. POGREŠKE U ZAVARENIM SPOJEVIMA.....	23
4.1. Hladne pukotine.....	23
4.1.1. Uzroci nastajanja hladnih pukotina.....	24
4.1.1.1. Utjecaj strukture na nastanak hladnih pukotina.....	25
4.1.1.2. Utjecaj naprezanja.....	25

4.1.1.3. Utjecaj difuzijskog vodika.....	26
5. METODE ISPITIVANJA ZAVARLJIVOSTI.....	29
5.1. Ekvivalent ugljika.....	29
5.2. Implant test.....	31
5.3. Tekken test.....	34
6. EKSPERIMENTALNI DIO.....	36
7. ANALIZA REZULTATA.....	40
8. ZAKLJUČAK.....	43
9. POPIS LITERATURE.....	44

POPIS SLIKA

Slika 1	Shematski prikaz ovisnosti čvrstoće metala o gustoći dislokacija	3
Slika 2	Promjena svojstava materijala uslijed hladne deformacije	5
Slika 3	Shematski prikaz smjerova razvoja čelika u drugoj etapi	9
Slika 4	σ - ε dijagram za različite vrste čelika	10
Slika 5	Međusobna interakcija svih faktora koji određuju zavarljivost materijala	13
Slika 6	Shematski prikaz zavarenog spoja	14
Slika 7	Solidifikacija kristala u metalu zavora uz mogućnost nastanka pukotina	15
Slika 8	ZUT zavarenog spoja nelegiranog niskougličnog feritno - perlitnog čelika s 0,2 %C	16
Slika 9	Podjela naprezanja u zavaru pri skretanju toka sile	18
Slika 10	Oblikovanje zavarenih konstrukcija pri dinamičkom opterećenju	18
Slika 11	Tok sile u kutnim zavarima	19
Slika 12	Podjela naprezanja u tupom spoju (σ_k zarezno djelovanje)	19
Slika 13	Širina zone predgrijavanja	21
Slika 14	Lokacije i orijentacije hladnih pukotina prema IIW	24
Slika 15	Utjecajni čimbenici nastanka hladnih pukotina	25
Slika 16	Paralelni niz pukotina u grubozrnatom ZUT-u, povećanje 1000x	27
Slika 17	Karakteristične hladne pukotine u području zavarenih spojeva	28
Slika 18	Implant uzorak s obostranim navojem	31
Slika 19	Prikaz navara na Implant pločama	32
Slika 20	Shematski prikaz uređaja za ispitivanje po Implant metodi	32
Slika 21	Izgled ispitne ploče za ispitivanje po Implant metodi	33
Slika 22	Dijagram opterećenja implant (epruveta) tijekom vremena do loma	33
Slika 23	Pukotina uzrokovana vodikom	34
Slika 24	Shematski prikaz sklonosti hladnim pukotinama po Tekken metodi	35
Slika 25	Ovisnost temperature predgrijavanja o faktorima (d i Q) za API 5L X70	40
Slika 26	Ovisnost temperature predgrijavanja o faktorima (d i Q) za API 5L X80	41

POPIS TABLICA

Tablica 1	Klasifikacija pogrešaka u zavarenim spojevima	23
Tablica 2	Formule za izračun ekvivalenta ugljika	30
Tablica 3	Kemijski sastav čelika API 5L X7036	37
Tablica 4	Zahtjevi za mehanička svojstva čelika X70 prema normi API 5L [11]	37
Tablica 5	Vrijednosti temperatura predgrijavanja za čelik X70 prema Ito-Bessyo formuli	37
Tablica 6	Vrijednosti temperatura predgrijavanja za čelik X70 prema HRN EN 1011-2	38
Tablica 7	Kemijski sastav čelika API 5L X80 prema atestu i laboratorijskom ispitivanju	38
Tablica 8	Mehanička svojstva materijala API 5L X80	38
Tablica 9	Temperatura predgrijavanja za čelik X80 prema Ito-Bessyo formuli	38
Tablica 10	Temperatura predgrijavanja za čelik X80 prema HRN EN 1011-2	39

POPIS OZNAKA

Latinske oznake

Oznaka	Opis	Mjerna jedinica
R_e	Granica razvlačenja	N/mm^2
R_m	Vlačna čvrstoća	N/mm^2
σ_{dop}	Dopušteno naprezanje	N/mm^2
$R_{p0,2}$	Konvencionalna granica razvlačenja	N/mm^2
T_t	Temperatura taljenja	K
C_{ekv}	Ekvivalent ugljika	%
ε	Istezanje	mm/mm
σ_{k1}	Vršno naprezanje	N/mm^2
$E; Q$	Unesena toplota	kJ/cm
I	Jakost struje zavarivanja	A
U	Napon zavarivanja	V
v_z	Brzina zavarivanja	cm/min
T_m	Temperatura između prolaza	K
P_{cm}	Ekvivalent ugljika prema Ito-Bessyo	%
P_w	Parametar sklonosti pukotinama	%
H_D	Sadržaj difuzijskog vodika u dodatnom materijalu	ml H_2 / 100 g zavara
d	Debljina osnovnog materijala	mm
T_p	Temperatura predgrijavanja	K
CET	Ekvivalent ugljika prema normi HRN EN 1011-2	%

Grčki simboli

η – koeficijent stvarno unesene topline ovisno o pojedinom postupku zavarivanja

POPIS KRATICA

WSA	World Steel Association
BCT	Body Centered Tetragonal
FCC	Face Centered Cubic
M/A	Martenzit/Austenit
TMCP	Thermo Mechanical Controlled Process
ISO	International Organization for Standardization
ZT	Zona taljenja
ZUT	Zona utjecaja topline
OM	Osnovni materijal
MZ	Metal zavara
TIG	Zavarivanje volframovom elektrodom u zaštiti inertnog plina
IIW	International Institute of Weilding
BCC	Body Centered Cubic
MAG	Zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom
REL (B)	Ručno elektrolučno zavarivanje bazičnom elektrodom
FCAW (R)	Zavarivanje praškom punjenom žicom - rutilni prašak

SAŽETAK RADA

U ovom radu obrađena je problematika zavarljivosti čelika visoke čvrstoće.

U teoretskom dijelu rada detaljno je objašnjen pojam zavarljivosti i analizirani su uzročno-posljedični mehanizmi nastanka pukotina u zoni zavarenog spoja. Opisani su razni mehanizmi očvrsnuća i način proizvodnje ove vrste čelika. Također, dan je prikaz razvoja ove vrste čelika kroz povijest, te su objašnjene tri osnovne metode za ispitivanje i procjenu zavarljivosti.

U eksperimentalnom dijelu rada analitičkim metodama interpretacije ekvivalenta ugljika ispitana je zavarljivost dvije vrste visokočvrstih čelika gradacije X70 i X80 prema API 5L standardu. U razmatranje su uzeta tri različita postupka zavarivanja: MAG, REL (B) i FCAW (R). Također, pretpostavljena su dva različita unosa topline (1 i 3 [kJ/mm]) i dvije različite debljine materijala (10 i 30 [mm]). Na temelju navedenih podataka izračunana je temperatura predgrijavanja za pojedini čelik i predložena je optimalna metodologija za primjenu u praksi.

KLJUČNE RIJEČI: zavarljivost, čelici povišene čvrstoće, difundirani vodik, hladne pukotine.

1. UVOD

Čelik je metastabilno kristalizirana legura željeza i ugljika ($\leq 2\%C$), uz prisutne pratioce (Si, Mn) i nečistoće (P, S i ostali) i uz eventualni dodatak jednog ili više legiranih elemenata [1]. Čelik je danas najvažniji tehnički materijal u proizvodnji i primjeni. Prema podacima „Udruge svjetskih proizvođača čelika“ (WSA - World Steel Association) samo je u studenom 2014. godine proizvedeno preko 130 milijuna tona čelika, dok je u svijetu proizvedeno preko 1500 milijuna tona. Vrijedi spomenuti da je Kina vodeća zemlja u proizvodnji čelika s udjelom od preko 45 % u ukupnoj svjetskoj proizvodnji, dok je Hrvatska, nažalost, na samom začelju kad su u pitanju zemlje Europske Unije.

Mnogi današnji znanstvenici istražuju nove materijale (polimere, kompozite, posebne čelike visoke čvrstoće,...) koji će dati bolja svojstva od već postojećih materijala. Pošto je tema ovog seminarskog rada vezana uz čelike visoke čvrstoće, posebna pozornost biti će usmjerenja na navedeni čelik.

Cilj razvoja čelika visoke čvrstoće je postignuće više granice razvlačenja R_e i više vlačne čvrstoće R_m , a time i višeg dopuštenog naprezanja σ_{dop} u radu. Primjenom ovih čelika smanjuju se nosivi presjeci kod jednakih opterećenja, odnosno smanjuje se masa i volumen konstrukcije, što ujedno dovodi i do nižih ukupnih troškova konstrukcije.

Najveće prednosti ove vrste čelika su: smanjenje mase konstrukcije, manji trošak materijala (iako je materijal nešto skuplji, masa je puno manja), sniženje troškova obrade, smanjenje transportnih troškova, omogućivanje većih raspona npr. mostova - zbog manje vlastite mase konstrukcije, smanjenje inercijskih sila pokretanja i zaustavljanja, zbog debljine manja zaostala naprezanja konstrukcije. Iako su stroži zahtjevi u pogledu zavarljivosti i primjeni tehnologije zavarivanja kod ove vrste čelika naspram običnog niskougljičnog čelika možemo reći da je prednost visokočvrstih čelika i olakšanje zavarivanja jer je lakše zavariti ploču debljine 10 mm nego ploču debljine 30 mm!

Naravno, ovaj materijal ima i neka ograničenja - modul elastičnosti ostaje isti neovisno o veličini $R_{p0.2}$. Posljedica toga je smanjenje krutosti konstrukcije primjenom čelika koji imaju visoke vrijednosti R_e . Veći $R_{p0.2}$ znači veću osjetljivost na zarezno djelovanje što posebno dolazi kod izražaja na konstrukcijama koje su dinamički opterećene. Porastom čvrstoće čelika povećava se brzina propagacije pukotina u materijalu.

Zavarivanje je najčešća tehnologija kojom se spaja ova vrsta materijala. U ovom seminarskom radu biti će opisani glavni problemi u pogledu zavarljivosti visokočvrstih čelika, kao i mehanizmi nastanka pukotina u zoni zavarenog spoja.

2. ČELICI POVIŠENE ČVRSTOĆE

2.1. Općenito o čelicima povišene čvrstoće

Cilj razvoja ovih čelika je postignuće više granice razvlačenja i više vlačne čvrstoće, pa time i višeg dopuštenog naprezanja u radu. Primjenom ovih čelika smanjuju se nosivi presjeci kod jednakih opterećenja, odnosno smanjuje se masa i volumen konstrukcije, što dovodi do sniženja ukupnih troškova konstrukcije. Kod strojeva i vozila manja masa znači i manji utrošak pogonske energije i smanjenje gubitaka uslijed inercijskih sila pri pokretanju i zaustavljanju. Pri razvoju čelika povišene čvrstoće nastojao se zadržati povoljan omjer R_e/R_m (0,70...0,85), što je tzv. "plastična rezerva", tako da u slučaju preopterećenja prije dolazi do plastične deformacije, a ne do loma materijala. Zadržavanjem niskih udjela ugljika te legirnih elemenata zavarljivost ostaje zadovoljavajuća [1].

Čelike povišene ili visoke čvrstoće treba primjenjivati uzimajući u obzir sljedeće činjenice [1]:

- Kod nekih tlačno opterećenih konstrukcija tankih presjeka može se pojaviti povećano izvijanje, a kod savijanja veliki progib. To mogu biti dugačke mosne konstrukcije, dizalice, dugački brodovi i sl. Dakle, vidljiv je problem krutosti, odnosno stabilnosti konstrukcije. Krutost konstrukcije nije određena samo granicom razvlačenja, nego poglavito modulom elastičnosti, koji je gotovo jednak za sve vrste čelike. Zbog toga u tim uvjetima opterećenja, primjena ovih čelika ne donosi bitne prednosti;
- Korozija dodatno smanjuje debljinu stijenke pa se vremenom smanjuje nosivost presjeka i o tome se mora voditi računa pri dimenzioniranju presjeka;
- Kod ove vrste čelika dinamička izdržljivost i otpornost na naglo širenje pukotina nisu proporcionalno povećani s granicom razvlačenja. Čelici su osjetljivi na zarezno djelovanje pa je potreban oprez kod primjene u uvjetima promjenjivog dinamičkog opterećenja;
- Porastom granice razvlačenja opada deformabilnost (sposobnost materijala da se plastično deformira bez pojave loma), a raste osjetljivost prema pojavi krhkog loma.

Čelike visoke čvrstoće dijelimo u sljedeće skupine [4]:

- čelici povišene čvrstoće $360 < R_{p0,2} \leq 500 \text{ N/mm}^2$;
- čelici visoke čvrstoće $500 < R_{p0,2} \leq 1000 \text{ N/mm}^2$;
- ultračvrsti čelici $R_{p0,2} > 1000 \text{ N/mm}^2$.

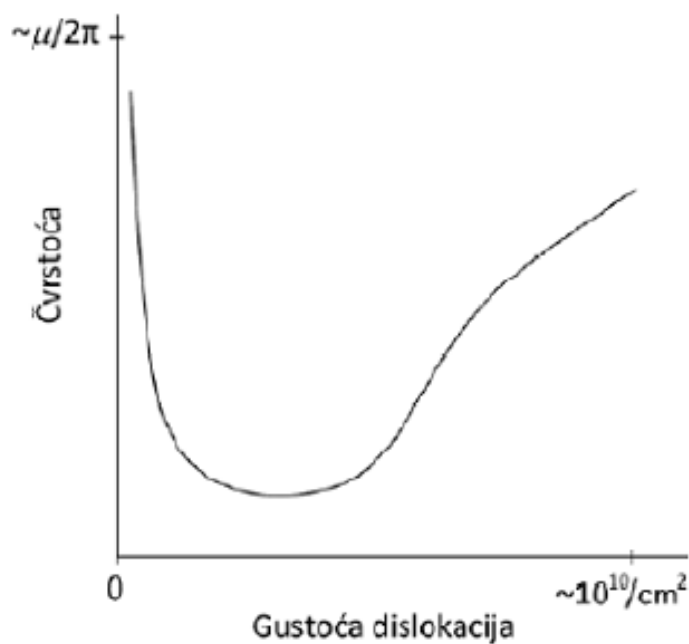
2.2. Mehanizmi očvrstnuća

Povišenje čvrstoće čelika ponajprije ovisi o mogućnostima modificiranja njegove mikrostrukture. Tako se čelici s jednofaznom feritnom mikrostrukturom ne mogu očvrstnuti kaljenjem, ali su zato očvrstljivi precipitacijom (uz dodatak odgovarajućih legirnih elemenata) [1].

Svi načini povišenja čvrstoće temelje se na otežanom gibanju dislokacija nastajanjem prepreka. Dislokacija je narušena periodičnost strukture duž neke kristalne linije. Spada u jednodimenzijske ili linijske nesavršenosti kristalne rešetke. Ta nesavršenost jako utječe na mehanička svojstva metalnih materijala [2]. Posljedica otežanog kretanja dislokacije obično je povišenje granice razvlačenja dok vlačna čvrstoća ne mora rasti. Kod očvrstnuća potrebno je postići optimalni kompromis između granice razvlačenja i duktilnosti materijala te je zato dislokacije potrebno učiniti teško pokretnima, ali ne i posve nepokretnima [1].

Maksimalne vrijednosti čvrstoće metala postižu se ili za izrazito mali broj dislokacija ili za vrlo veliki broj dislokacija ($> 10^{10} \text{ cm/cm}^3$) dok niske vrijednosti čvrstoće odgovaraju broju dislokacija od približno 10^3 do 10^5 cm/cm^3 [3].

Na slici 1 shematski je prikazana ovisnost čvrstoće metala o gustoći dislokacija.



Slika 1 Shematski prikaz ovisnosti čvrstoće metala o gustoći dislokacija [3].

Osnovni mehanizmi (načini) očvršnuća - povišenja granice razvlačenja su [4]:

- Očvršnuće kristalima mješancima;
- Očvršnuće martenzitnom transformacijom;
- Očvršnuće hladnom deformacijom;
- Očvršnuće granicama zrna (usitnjenjem zrna);
- Očvršnuće izlučivanjem (precipitacijom) i disperzijom faza.

2.2.1. Očvršnuće kristalima mješancima (očvršnuće legiranjem)

Očvršnuće metalnog materijala kristalima mješanca nastaje dodavanjem nekog drugog elementa (metalnog ili nemetalnog) koji ulazi u čvrstu otopinu kristalne rešetke osnovnog materijala. Dodani elementi uzrokuju napetosti i iskrivljenje (distorziju) kristalne rešetke što ima za posljedicu povećanje mehaničke otpornosti jer napetosti i distorzija rešetke otežavaju gibanje dislokacija [5]. Ovisno o vrsti i veličini dodanog elementa razlikujemo dvije vrste kristala mješanaca: uključinske (intersticijske) - ulaze u međuatomne praznine ili zamjenbene (suptitucijske) kristale mješance - oni zamjenjuju atome osnovnog metala.

Na porast čvrstoće najjače djeluje povišenje masenog udjela ugljika u čeliku, ali time opadaju svojstva duktilnosti. Od svih načina očvršnuća ovaj daje najmanje efekte [1].

2.2.2. Očvršnuće martenzitnom transformacijom

Očvršnuće martenzitnom transformacijom ili kaljenje je postupak toplinske obrade koji se sastoji od ugrijavanja na temperaturu austenitizacije i progrijavanja, držanja pri temperaturi austenitizacije (u svrhu otapanja ugljika i legirajućih elemenata u austenitu) i gašenja (u svrhu postizanja martenzitne mikrostrukture). Kaljenjem nastaje nova strukturna faza koju nazivamo martenzit.

Martenzit ima tetragonalnu rešetku (BCT - body centered tetragonal) nastalu preklapanjem austenitne (FCC – face centered cubic) rešetke i zadržavanjem atoma ugljika u prisilnoj čvrstoj otopini (ovaj je mješanac također intersticijskog tipa). Do preklapanja je došlo pri nekoj temperaturi pretvorbe manjoj od martenzit start, a atom ugljika je „zarobljen“ jer nije bilo vremena da difundira iz sustava austenitnih rešetki [5].

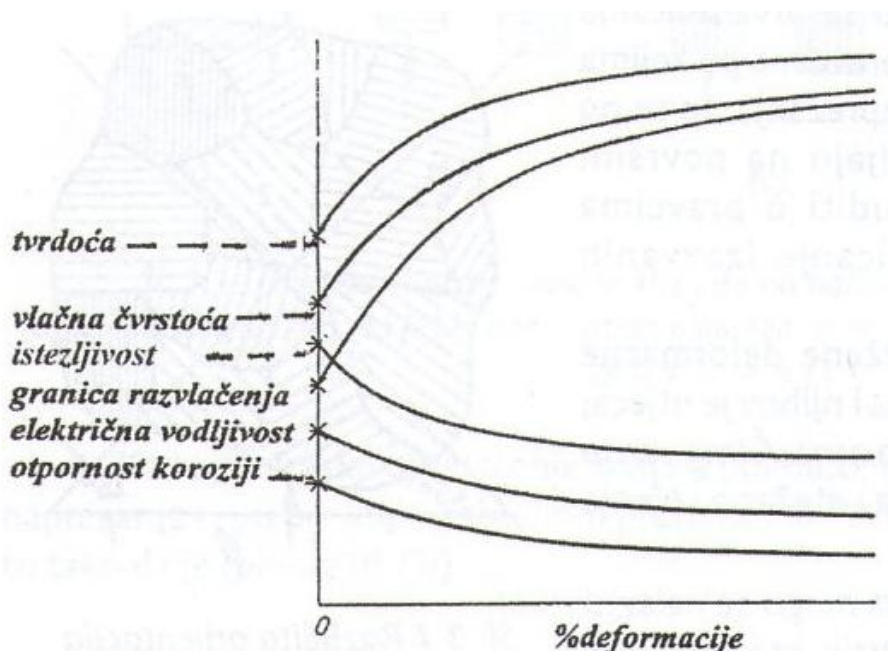
Atom ugljika prisilno rastvoren u M-rešetci uzrokuje njenu distorziju u jednom smjeru čime uzrokuje - porast tvrdoće i čvrstoće, ali i pad istezljivosti i žilavosti, te je zbog toga nužno provesti popuštanje.

2.2.3. Očvršnuće hladnom deformacijom

Deformacija se naziva hladnom ako se postupak deformiranja obavlja na temperaturi koja je niža od $0,3 T_t$ gdje je T_t temperatura taljenja deformirajućeg materijala. Uslijed deformiranja dolazi do mehaničkih, fizikalnih i kemijskih promjena svojstava materijala [6]. Najvažnija promjena koja se događa kao posljedica trajne plastične deformacije je pojava očvršćenja materijala (slika 2.).

Postoji nekoliko teorija koje objašnjavaju pojavu očvršćenja materijala hladnom deformacijom: teorija amornog sloja, teorija fragmentacija i teorija dislokacija [6]. Suvremena istraživanja su pokazala da teorija dislokacija objašnjava pojavu očvršćenja na najoptimalniji način. Dislokacije se unose u materijal pomoću hladnog plastičnog deformiranja. Što je viši stupanj deformacije veća je gustoća dislokacija i više su vrijednosti granice razvlačenja, ali se time znatno smanjuje žilavost materijala. Ovaj je mehanizam očvršćenja vrlo učinkovit obzirom na sam iznos očvršćenja, ali ako se pri unošenju novih dislokacija njihova gustoća približi graničnoj, nastupa koncentracija naprezanja koja dovodi do pukotina i pojave loma. Na ovaj način posebno su očvrstivi metali i legure s kubično plošno centriranom strukturom tzv. FCC rešetkom (npr. austenitni čelici).

Na slici 2 prikazana je ovisnost svojstva materijala u ovisnosti o stupnju deformacije.



Slika 2 Promjena svojstava materijala uslijed hladne deformacije [6].

2.2.4. Očvrsnuće granicama zrna (usitnjenjem zrna)

Granice zrna predstavljaju barijeru klizanju dislokacija te tako dodatno sprječavaju njihovu pokretljivost i povećavaju granicu razvlačenja. Djelovanje granica zrna povoljnije je u odnosu na ostale vrste zapreka zbog toga što je broj dislokacija koje se gomilaju u velikokutnim granicama zrna ograničen i prije nego što se dostigne kritična gustoća koja bi mogla uzrokovati nastanak inicijalne mikropukotine, dolazi do procesa klizanja dislokacija preko granice u drugo zrno ako je ono povoljno orijentirano [4]. Stoga su učinkovitija sitnija zrna, jer je time veća vjerojatnost povoljne orijentacije susjednih zrna. Dakle, usitnjenjem zrna dolazi do povećanja žilavosti. Usitnjenje zrna se obično kombinira s ostalim načinima očvrsnuća [1].

2.2.5. Očvrsnuće izlučivanjem (precipitacijom) i disperzijom faza

Radi se o izdvojenim fazama nelegiranih ili legiranih karbida ili ostalih prikladnih intermetalnih spojeva i prijelaza faza iz homogene mikrostrukture ferita, austenita ili martenzita. Ove faze nastaju kada se prekorači granica topljivosti stranih atoma u rešetki željeza. Djelovanje tih faza ovisi o njihovom rasporedu i vrsti [1].

2.3. Proizvodnja čelika povišene čvrstoće

Pošto je instalacija cjevovoda gotovo nezamisliva bez čelika povišene čvrstoće ovdje će se razmotriti proizvodnja cijevi od navedene vrste materijala. Cjevovodi su, zbog značenja na ljudski život i okoliš, maksimalno „odgovorne“ konstrukcije, što znači da ne smije doći do nikakvih pogrešaka u proizvodnji ili kasnije prilikom zavarivanja inače je velika vjerojatnost nastanka havarije. Shodno tome, težimo proizvodnji čelika s što nižim udjelom nečistoća.

Današnje tehnologije oblikovanja cijevi uključuju primarni postupak tehnologije oblikovanja valjanjem. U drugoj polovici 20. stoljeća razvijena je nova tehnologija koja obuhvaća i toplinsku obradu, pa je takav postupak nazvan termomehanička obrada. Čelici proizvedeni takvim načinom posjeduju, već u valjanom stanju, povoljnu granicu razvlačenja i otpornost prema krhkom lomu.

Termomehanička obrada (TMCP - Thermo Mechanical Controlled Process) je način proizvodnje čelika za cijevi koji se sastoji od valjanja i toplinske obrade. Izraz „termomehanički“ znači da se plastična deformacija odvija prije ili za vrijeme strukturne pretvorbe materijala.

Svrha TMCP načina proizvodnje je postizanje igličastog ferita umjesto feritno perlitne strukture karakteristične za konvencionalne čelike [10].

Postupak termomehaničkog valjanja podijeljen je u nekoliko koraka koji su zaslužni za konačna svojstva materijala:

- a) Predgrijavanje - temperatura predgrijavanja od velike je važnosti kao i prisutnost nerastvorenih čestica karbida. Cilj predgrijavanja je postizanje jednolike raspodjele topline po pločama i potpuno rastvaranje karbida i nitrida. Iznos temperature predgrijavanja ovisi o sastavu mikrolegiranih elemenata u čeliku. Za čelike povišene čvrstoće mikrolegirane niobijem, raspon temperature predgrijavanja iznosi od 1150 do 1250 °C dok će čestice TiN pri tim temperaturama ostati nerastvorene [7].
- b) Grubo mehaničko valjanje - provodi se s ciljem postizanja najfinije moguće austenitne strukture prije postizanja temperature rekristalizacije. Iznad temperature A_3 dolazi do rekristalizacije i očvršćivanja faza. Za većinu čelika za cjevovode temperatura grubog mehaničkog valjanja iznosi 950 do 1200 °C [7].
- c) Završno termomehaničko valjanje - svrha ove faze proizvodnje je akumulacija naprezanja pri valjanju u temperaturnom području ispod A_3 , gdje još nije nastupila rekristalizacija austenitnog zrna. Time nastaje feritna struktura. U toj temperaturnoj zoni dolazi do precipitacije niobijevih nitrida (NbN) uslijed smanjene topivosti Nb u austenitu. Austenitno zrno se pritom izdužuje. Početna temperatura kontroliranog termomehaničkog valjanja iznosi od 1050 do 950 °C i završava na temperaturi 730 do 1000 °C, što uvelike ovisi o kemijskom sastavu, tj. udjelu mikrolegiranih elemenata i o uvjetima proizvodnje [7].
- d) Snažna redukcija debljine lima - snažna redukcija (od 60 do 85%) za vrijeme kontroliranog procesa termomehaničkog valjanja povećava granicu razvlačenja bez nepovoljnog djelovanja na prijelaznu temperaturu [7]. Prijelazna temperatura jest ona temperatura pri kojoj žilavost materijala pada ispod 27 J prema Charpy-u, tj. pri kojoj materijal iz žilavog stanja prelazi u krhko. Snažna redukcija rezultira usitnjavanjem zrna.
- e) Režim hlađenja - režim hlađenja vrlo je bitan s aspekta postizanja optimalne čvrstoće. Kontroliranim hlađenjem regulira se promjena mikrostrukture, usitnjavanje feritnog zrna i precipitacijsko očvršćivanje [7].
- f) Temperatura namatanja - ne dolazi do promjene strukture materijala, međutim ova faza je vrlo bitna za precipitacijsko očvršćivanje, stoga je potrebno kontrolirati iznos temperature da bi se postigao maksimalan efekt. Ukoliko je temperatura namatanja preniska, precipitacija je oslabljena što krajnje rezultira niskim iznosom čvrstoće materijala [7].

Uz naveden način proizvodnje čelici povišene čvrstoće svoja dobra mehanička svojstva (sitnozrnata mikrostruktura) i vrlo dobru zavarljivost duguju mikrolegiranim elementima (najčešće Nb, V ili Al) i vrlo niskom udjelu ugljika ($<0,1\text{ }\%C$). Prilikom proizvodnje

čelika težimo što manjem udjelu nečistoća (S, P) kako bi smanjili njihov negativni utjecaj na zavarljivost.

2.4. Prikaz razvoja čelika visoke čvrstoće

Razvoj konstrukcijskih čelika možemo podijeliti u nekoliko etapa. Intenzivan razvoj konstrukcijskih čelika počinje početkom 20. stoljeća, a razdoblje do završetka II. Svjetskog rata nazivamo prvom etapom razvoja ove vrste čelika. Prvi razvijeni čelici imali su vrijednost granice razvlačenja $R_{p0,2}$ od 210 do 240 N/mm², dok im je vrijednost vlačne čvrstoće bila od 330 do 500 N/mm². Isti su imali sadržaj ugljika oko 0,2 %C.

Prvi koraci unapređenja kvalitete ovih čelika bili su smirivanje silicijem da bi se poboljšala zavarljivost, te povišenje udjela ugljika na oko 0,25 %C kako bi se granica razvlačenja povisila na oko 260 N/mm². Daljnje povišenje udjela ugljika na oko 0,32 %C dalo je čelik s granicom razvlačenja od 290 N/mm², ali s već primjetno sniženom žilavošću.

U to vrijeme razvija se postupak legiranja, te se udio ugljika ponovno snizuje na 0,2 %C. Mogućnost utjecaja legirnog elementa uočila se vrlo rano što nam dokazuje primjer iz 1907. god. Naime, radi se o oplati broda „Mauretania I“. Oplata je izrađena od 0,27 %C, 1,2 %Si i 0,7 %Mn.

U godinama koje su slijedile razvile su se razne vrste čelika sa udjelima ugljika preko 0,2 %C. Međutim, niti jedna od njih nije se zadržala dulje na tržištu zbog raznih nedostataka. Ista je sudbina bila s čelikom tadašnje oznake StSi, kemijskog sastava: 0,08...0,18 %C, max. 1,2 %Si, 0,5...1,0 %Mn, max. 0,04 %P i max. 0,04 %S. Navedeni čelik imao je $R_{p0,2 \min} = 360$ N/mm², no zbog teškoća izradbe i problema prilikom zavarivanja ubrzo je i taj čelik povučen iz proizvodnje.

Intenzivno su se istraživali utjecaji legiranih elemenata na svojstva čelika. Došlo se do zaključka da novi čelici povišene granice razvlačenja i ne bi morali biti jedinstvenih sastava, nego bi čeličanama trebalo prepustiti proizvoljno kombiniranje dodataka, kako bi one, naravno uz nužna ograničenja u pogledu zavarkljivosti, savitljivosti, prijelazne temperature, žilavosti itd., mogle postići tražena mehanička svojstva proizvoljnim kombiniranjem dodataka. Tako su se dobile poznate kombinacije legiranja: Mn - Si - Cu, Mn - Cr - Cu, Mn - Mo - Cu itd. Također se uočilo i posebno pozitivno usitnjenje perlitno - feritnog zrna i to kako na povišenje granice razvlačenja, tako i na sniženje prijelazne temperature.

Na osnovi navedenih spoznaja o utjecanju legiranja i usitnjenju zrna čelika proizveden je i normiran čelik označen u DIN-u kao St52-3. Čeličanama su za izradu ovog čelika normirani zahtjevi na sastav:

$C_{\max}=0,22 \%$; $Si_{\max}=0,55 \%$; $Mn_{\max}=1,7 \%$; $P_{\max}=0,045 \%$; $S_{\max}=0,045 \%$; $N_{\max}=0,009 \%$; $Al_{\min}=0,020 \%$

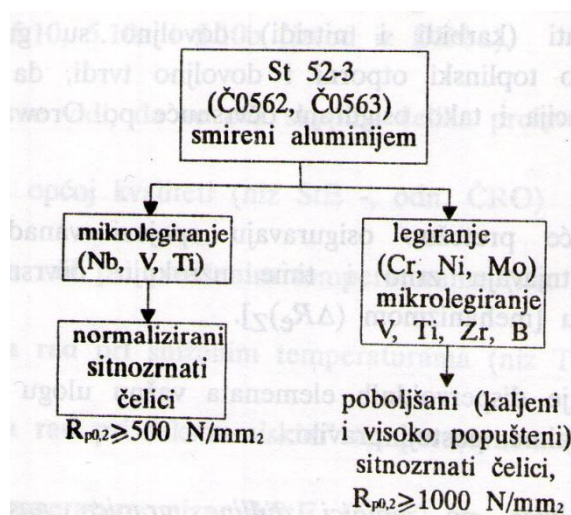
Mehanička svojstva su bila: $R_m=510...610 \text{ N/mm}^2$, $R_{p0,2 \min}=330...360 \text{ N/mm}^2$, $A_{\min}=22 \%$ dok je minimalna žilavost na $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ trebala iznositi 20 J.

Rezultat razvoja konstrukcijskih čelika u prvoj etapi 20. st. bio je upravo čelik St52-3. Navedeni čelik proizvodi se i danas.

Niskolegirani čelik St52-3 poslužit će pri daljnjem razvoju konstrukcijskih čelika kao osnova razvoja mikrolegiranih sitnozrnatih čelika povišene granice razvlačenja. Naime, zbog velike mase proizvedenih konstrukcijskih čelika igrat će veliku ulogu u njihovoj ekonomičnosti trošak legiranja, stoga se razvijaju mikrolegirani čelici. Također, traži se legirni dodaci ne budu oni koji su u svijetu već postali deficitarni.

Spoznaja o povoljnom utjecaju sitnog zrna pri razvoju u prvoj etapi nametnula je i osnovni smjer daljnjeg razvoja. Tako je vrhunac razvoja čelika u prvoj etapi polazna točka suvremenog razvoja čelika u drugoj etapi.

Pošto je jedno od ključnih svojstava čelika upravo njegova zavarljivost porast sadržaja ugljika nije dolazio u obzir. Spoznaja o djelovanju disperzoidnih elemenata (Nb, V, Ti, Zr) na daljnu mogućnost usitnjenja zrna, te spoznaja o mogućnosti djelovanja na čelik legiranjem, a time i kaljenjem omogućila je da se čelik dalje razvija u dva smjera kako je i prikazano slikom 3.



Slika 3 Shematski prikaz smjerova razvoja čelika u drugoj etapi [4].

Važnu ulogu pri postizanju mikrostrukture čelika ima regulirano valjanje (u čeličani). Ako se nije kontrolirano valjalo do sniženih završnih temperatura, trebat će čelik dovesti u optimalno stanje normalizacijom.

Gotovo paralelno s razvojem normaliziranih mikrolegiranih čelika počeli su se razvijati i zavarljivi čelici za poboljšavanje, tj. čelici s najviše 0,22 %C (uobičajeni čelici za poboljšavanje sadrže 0,3 do 0,6 %C). Time su se dijelom preklapile druga i treća etapa

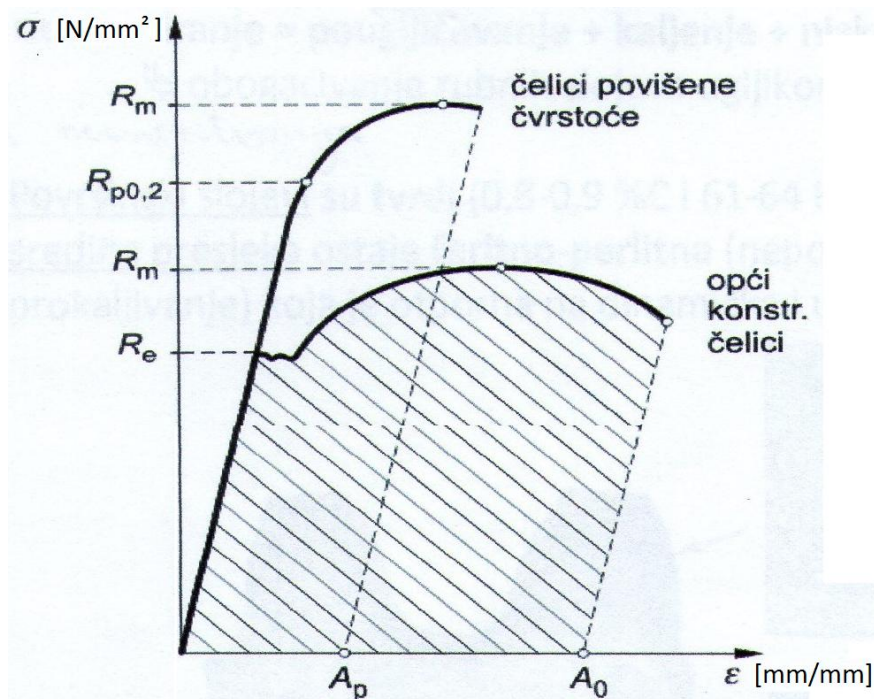
razvoja nelegiranih i niskolegiranih konstrukcijskih čelika. Sniženje udjela ugljika snizilo je i čvrstoće i granicu razvlačenja, pa je taj gubitak trebalo nadoknaditi legiranjem, ali takvim, koje neće previše povisiti ekvivalent ugljika C_{ekv} .

U početku treće etape razvoja prevladala je težnja prema povišenju otpornosti na popuštanje i ujedno prema potisnuću perlitne pretvorbe u dulja trajanja, a „izvlačenja“ bainitne pretvorbe u kraća trajanja. Takve utjecaje imaju elementi molibden i krom. Razlog tome je bila opasnost da će legirani niskougljični čelici izgubiti dio svoje granice razvlačenja u radu pri povišenim temperaturama, a posebno se to odnosilo na zavarivanje odnosno na ZUT.

Kombinacijom osnovnih spoznaja utjecaja legirajućih elemenata i utjecaja mikrolegirajućih elemenata te potrebe prokaljivanja zbog postignuća visoke žilavosti popuštanjem dovela je do suvremenih niskougljičnih niskolegiranih sitnozrnatih čelika.

2.5. Dijagram σ - ϵ za čelike visoke čvrstoće

Na slici 4 prikazan je dijagram σ - ϵ za visokočvrsti čelik i za opći konstrukcijski čelik. Može se vidjeti jasna razlika između ta dva dijagrama u pogledu čvrstoće i istežljivosti. Također u ovom dijagramu se odlično može vidjeti spomenuta „plastična rezerva“ odnosno omjer R_e/R_m .



Slika 4 σ - ϵ dijagram za različite vrste čelika [1,2].

3. ZAVARLJIVOST ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE

Kao što je rečeno u uvodu zavarivanje je daleko najčešća tehnologija kojom se spaja ova vrsta materijala. Ključan problem kod čelika povišene čvrstoće predstavlja upravo njihova zavarljivost.

U literaturi susrećemo razne definicije vezane uz zavarljivost, međutim najpotpunija je dana od strane Međunarodnog instituta za zavarivanje, a usvojena je i od Međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO) i glasi [8]:

- „Komponenta (ili dio) načinjen od metalnih materijala smatra se zavarljivim određenim postupkom kada se uz primjenu pogodne procedure zavarivanjem može postići kontinuitet metalnog materijala. Istovremeno, zavareni spoj mora zadovoljavati postavljene kriterije mehaničkih i metalurških značajki kao i njihov utjecaj na konstrukciju koje je sastavni dio.“

Važno je reći da ne postoji jedinstvena metoda koja bi u potpunosti odredila pojam zavarljivosti. Kako bi se ispitala i ocijenila zavarljivost pojedinog materijala koristi se niz različitih metoda od kojih svaka služi za određivanje samo nekih svojstava iz navedene definicije.

Problem zavarljivosti čelika visoke čvrstoće pristupamo sa:

- 1) metalurškog,
- 2) konstrukcijskog i
- 3) izvedbenog stajališta.

1) Metalurška zavarljivost određena je svojstvima materijala, a čimbenici koji utječu na metaluršku zavarljivost čelika su [8,9,10]:

- nastajanje hladnih pukotina,
- nastajanje toplih pukotina,
- lamelarno trganje,
- krhki lom,
- povišenje tvrdoće materijala,
- starenje materijala i
- nastajanje pukotina u visokočvrstim materijalima.

Fizikalna svojstva koja utječu na zavarljivost materijala također proizlaze iz svojstava samog materijala kojeg zavarujemo [8,9]:

- koeficijent toplinske dilatacije (toplinsko rastezanje materijala),

- toplinska vodljivost,
- temperatura taljenja i
- mehanička čvrstoća i žilavost.

2) Konstrukcijska zavarljivost određena je svojstvima oblikovanja konstrukcije i vrstom opterećenja koja se javljaju. Čimbenici koji utječu na konstrukcijsku zavarljivost uključuju [8,9]:

- pravilnu distribuciju sila kroz dijelove konstrukcije,
- izvedbu zavora,
- debljinu radnih komada,
- utjecaj zarezanog djelovanja i
- razliku u krutosti između osnovnog materijala i metala zavora.

Pri oblikovanju konstrukcije treba voditi računa o uvjetima opterećenja kojima će konstrukcija biti izložena. Ti uvjeti obuhvaćaju [8]:

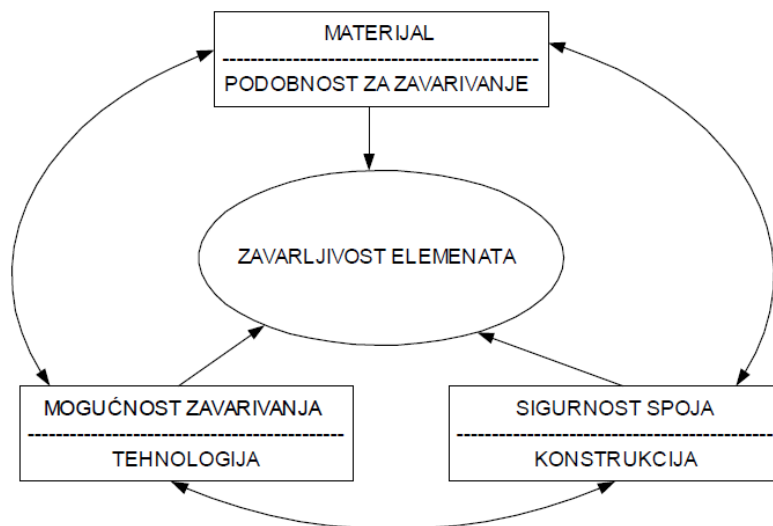
- vrstu i iznos naprezanja,
- dimenzijski iznos naprezanja,
- temperaturu i
- medij kojem je konstrukcija izložena (korozija).

3) Kada se govori o problemu zavarljivosti s pogleda izvedbenog stajališta, zapravo riječ je o kompletnoj proceduri zavarivanja koja uključuje:

- pripremu spoja (vrsta i oblik spoja)
- postupak zavarivanja, vrsta i oblik dodatnog materijala, parametri zavarivanja, redoslijed zavarivanja, broj prolaza, predgrijavanje, položaj zavarivanja, unos toplote,...
- obrada nakon zavarivanja (toplinska, mehanička, kemijska)

Kako bi konstrukcija bila zadovoljavajućih svojstava potrebna je međusobna interakcija svih navedenih faktora.

Na slici 5 prikazana je međusobna interakcija svih faktora koji utječu na zavarljivost materijala.



Slika 5 Međusobna interakcija svih faktora koji određuju zavarljivost materijala [8].

3.1. Metalurško stajalište zavarljivosti čelika

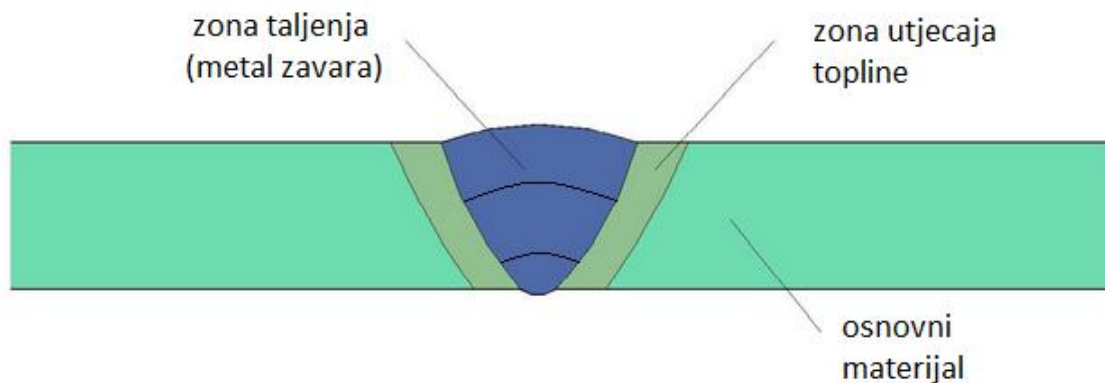
U ovom poglavlju razmotrit će se kako metalurška svojstva materijala utječu na zavarljivost čelika visoke čvrstoće. Posebna pozornost obratit će se na mehaničku čvrstoću, žilavost i tvrdoću dok će pukotine i mehanizam nastanka pukotina biti detaljno razrađeni u poglavlju 4.

3.1.1. Metalurgija zavarivanja

Pod pojmom metalurgija zavarivanja podrazumijevaju se pojave vezane s procesnom (dobivanje metala, rafinacija, legiranje, lijevane, itd.) i fizikalnom metalurgijom (kristalografija, mehanička ispitivanja, metalografija, itd.) [14].

Zavareni spoj se sastoji od zone taljenja (ZT) i zone utjecaja topline (ZUT) koju još nazivamo i prijelazna zona.

Shematski prikaz zavarenog spoja dan je na slici 6.



Slika 6 Shematski prikaz zavarenog spoja.

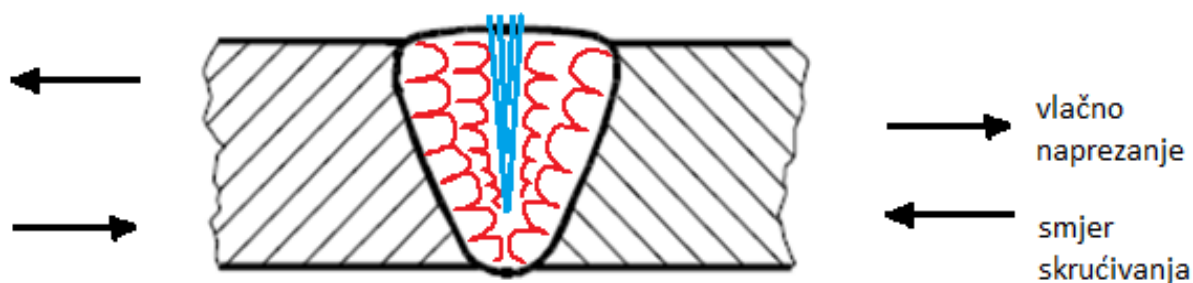
Posebnost tehnologije zavarivanja u odnosu na ostale tehnologije predstavljaju vremenski brze promjene temperature (i preko $1000\text{ }^{\circ}\text{C/s}$), te lokalno unošenje topline nekim izvorom topline. Lokalne temperature se kreću od temperature iznad tališta i vrelišta metala, pa sve do temperature okoline, a ponekad i ispod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, za slučajeve posebnih obrada kaljenjem. Takvi uvjeti uzrokuju lokalna istezanja i stezanja, a ona su uzrokom deformacija i napetosti. Još i uzrokuju kemijske reakcije između rastaljenog metala i okoline (troske, atmosfere), različitu rastvorljivost među elementima i fazama, te difuzijske procese. Sve navedeno za posljedicu daje neujednačenu mikrostrukturu presjeka zavarenog spoja uz prisustvo trajnih deformacija i zaostalih napetosti [12].

3.1.2. Metalurgija zone taljenja (ZT)

U kapljicama rastaljenog metala i kupki zavara dolazi do sličnih pojava kao pri proizvodnji, taljenju metala u pećima. Dolazi do međusobnog djelovanja rastaljenog metala, troske i okolišne atmosfere. Djelovanjem izvora topline dolazi do izgaranja pojedinih elemenata (C, Mn, Si, Cr, Ni, Ti) i drugih ili je pak moguće iz troske (obloga elektrode, prah) dolegirati rastaljeni metal raznim elementima odnosno mikrolegirati. Zbog utjecaja atmosfere oko rastaljenog metala i sastava rastaljenog metala dolazi u većoj ili manjoj mjeri do stvaranja oksida, nitrida, karbida, karbonitrida, sulfida, eutektika, intermetalnih spojeva i drugih faza [12,15].

Ovisno o vrsti metala, daljim hlađenjem u ZT, može doći do strukturnih promjena, izlučivanja različitih faza te grešaka (pore, pukotine). Pojava klica i rast kristala ovisit će o pothlađivanju rastaljenog metala. Obično kristali rastu okomito na rubove spoja, a sukobljavaju se u sredini, stvarajući zonu segregacija nečistoća s nižim talištem (slika 6), koje može uzrokovati vruće pukotine ili biti slabo mjesto pri opterećenju.

Na slici 7 prikazana je solidifikacija kristala u metalu zavora. Crvena boja predstavlja solidifikaciju kristala u metalu zavora, a plava boja predstavlja nečistoće koje imaju niže talište od osnovnog materijala.



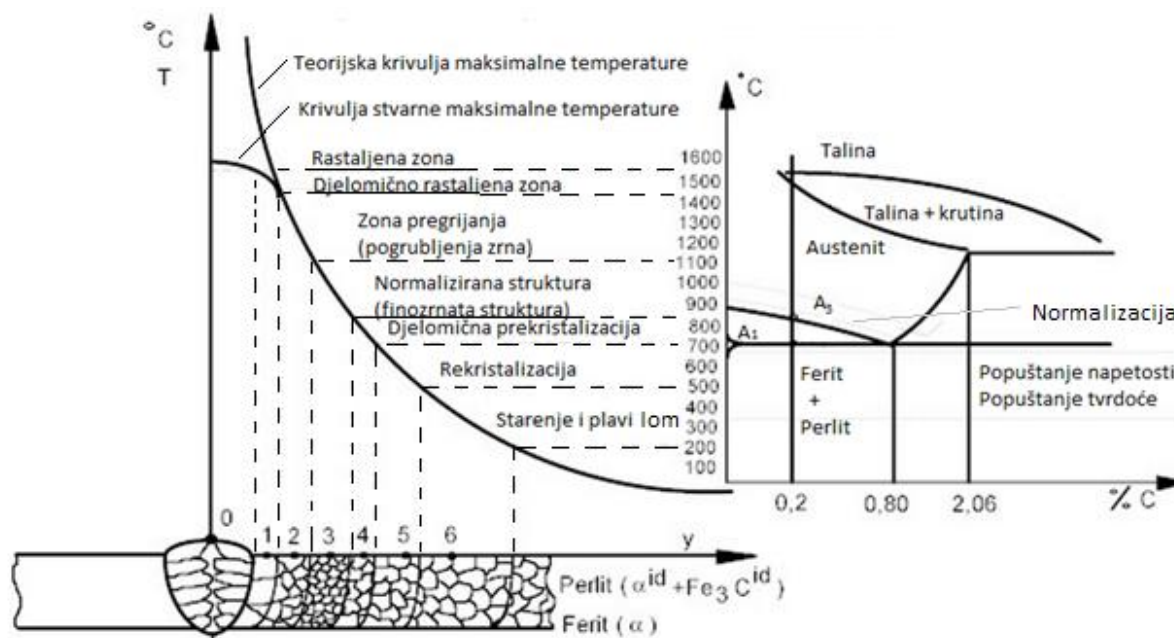
Slika 7 Solidifikacija kristala u metalu zavora uz mogućnost nastanka pukotina [8].

3.1.3. Metalurgija zone utjecaja topline (ZUT)

ZUT teorijski obuhvaća područje osnovnog materijala (OM), u kojem se OM nije talio za vrijeme zavarivanja, ali u kojem je zbog unošenja topline zavarivanjem došlo do promjene mikrostrukture, mehaničkih, korozivskih ili drugih svojstava [15].

Izrazite promjene strukture u ZUT-u kod dovoljno sporog hlađenja za nelegirani čelik su iznad A1 (723 °C). Ova zona će dati drugačiji refleks svjetlosti u odnosu na osnovni materijal, jer je u toj zoni došlo do promjene veličine zrna, usmjerenja zrna i strukture. Za poboljšane čelike, koji se kale i popuštaju pri relativno niskim temperaturama, npr. na 300 °C, bilo kakvo grijanje iznad 300 °C će uzrokovati bitne promjene svojstava OM (dobit će se niža čvrstoća), pa će ZUT obuhvatiti zonu zagrijavanja na temperaturama od 300 do 1500 °C. Širina ZUT ovisna je o unosu topline i iznosi najčešće 2 do 8 mm [15].

Na slici 8 prikazane su promjene u mikrostrukturi u ZUT-u.



Slika 8 ZUT zavarenog spoja nelegiranog niskougličnog feritno - perlitnog čelika s 0,2 %C [3,14].

Zona taljenja (na slici 8 označena sa 0) obuhvaća točke zavarenog spoja, koje su bile iznad likvidus linije, tj. koje su pri zavarivanju bile potpuno rastaljene. Za vrijeme ohlađivanja dolazi do kristalizacije, koja će dati strukturu različitu od strukture OM. Rast kristala i pojava klica ovisit će o pothlađivanju rastaljenog metala. Kristali obično rastu okomito na rubove spoja, a sukobljavaju se u sredini, stvarajući zonu segregacija nečistoća s nižim talištem, koja može uzrokovati vruće pukotine ili biti slabo mjesto pri opterećenju [3,15].

Djelomično rastaljena zona (na slici 8 označena sa 1) (između linija solidusa i likvidusa) predstavlja dvofazno područje (talina + krutina) koje je bogato legirnim elementima i nečistoćama (nečistoće imaju nižu točku taljenja), a sadrži i plinove. Lokalno povišen sadržaj nečistoća kod brzog hlađenja nakon zavarivanja ne može se difuzijom izjednačiti s okolinom, pa ostaje mreža otvrdnutih segregiranih nečistoća. Pri ovako visokim temperaturama dolazi i do taljenja ostalih nemetalnih faza (sulfidi, fosfidi, oksidi), čime metalna veza slabi i omogućuje pojavu vrućih pukotina [3,15].

Zona pregrijanja (na slici 8 označena sa 2) se nalazi ispod solidus točke i dosta iznad A₃ (1100 do 1450 °C). Dolazi do pogrubljenja zrna austenita, koja pri brzom hlađenju prelaze u Widmannstaettenovu strukturu, koja je nešto tvrđa i krhkija nego što je poželjno. U slučaju da se pojavi Widmannstaettenova struktura u čeliku, tada možemo ponovo postići fino zrno i žilavu feritno perlitnu strukturu normalizacijom, tj. zagrijavanjem nešto iznad A₃ i relativno sporim hlađenjem [3,15].

Zona normalizacije (na slici 8 označena sa 3) se nalazi nešto iznad A3. Struktura je finožrnata, normalizirana i obično posjeduje bolja svojstva od osnovnog materijala. Ovdje je zagrijavanjem došlo do pune transformacije ferita i perlita u austenit, a za hlađenja dolazi ponovno do transformacije u perlit i ferit stvaranjem klica i njihovim rastom u vrlo finu feritno-perlitnu strukturu [3,15].

Zona djelomične prekrystalizacije (na slici 8 označena sa 4) se nalazi u temperaturnom području između A1 i A3 točke, za vrijeme hlađenja, dolazi do nastajanja klica ferita, na granicama ili unutar zrna austenita, koje zatim rastu, a kad temperatura padne ispod točke A1, zaostali se austenit pretvara u perlit. Naravno, u ovisnosti o vrsti čelika i brzini hlađenja, moguća je i pretvorba zaostalog austenita u martenzit koji je tvrd i krhak te je stoga nepoželjan [3,15].

Zona rekristalizacije (na slici 8 označena sa 5) se nalazi na temperaturama nižim od A1 temperature do 500 °C gdje zaostali austenit prelazi u perlit [3].

Zona starenja i plavog loma (na slici 8 označena sa 6). Nalazi se u temperaturnom intervalu od 200 do 500 °C. Ne dolazi do strukturnih promjena ni oblika zrna, ali uslijed starenja može doći do krhkosti. Ostaje feritno-perlitna mikrostruktura. Ako je čelik zakaljiv, tada u ovoj zoni kao i u ostalim zonama koje su zagrijane iznad A3 može doći do zakaljivanja, a u konačnici i do 100% strukture martenzita, što ovisi o brzini hlađenja i sastavu čelika. Izbjegavanje zakaljivanja se može postići podgrijavanjem ili unošenjem veće količine topline zavarivanjem. Kod višeslojnog zavarivanja svaki naredni sloj odžari-normalizira, bar djelomično sloj ispod, što povoljno djeluje na nosivost spoja. Zavari u jednom prolazu imaju relativno grubu kristalnu strukturu [3,15].

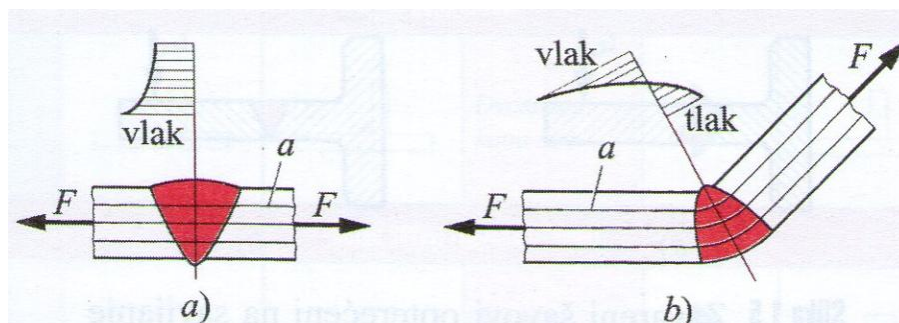
3.2. Konstrukcijsko stajalište zavarljivosti čelika

Potrebno je pravilno oblikovati zavarenu konstrukciju kako bi minimizirali mogućnost nastanka konstrukcijskih grešaka. Pri oblikovanju zavarenih konstrukcija treba pripaziti na sljedeća načela:

1) Pravilnu distribuciju sila kroz dijelove konstrukcije [16]

Za čvrstoću zavares presudan je tok sila, stoga je potrebno izbjegavati skretanje toka sila u zoni zavarenog spoja koliko je to god moguće! Skretanja u zoni zavarenog spoja izazivaju vršna naprezanja što se može vidjeti na slici 9. Pri mirnom opterećenju zarezna djelovanja ne umanjuju čvrstoću, ali snižuju sposobnost plastičnog deformiranja i time stvaraju opasnost od krhkog loma. Promjenjivim opterećenjem materijala smanjuje se njegova dinamička izdržljivost.

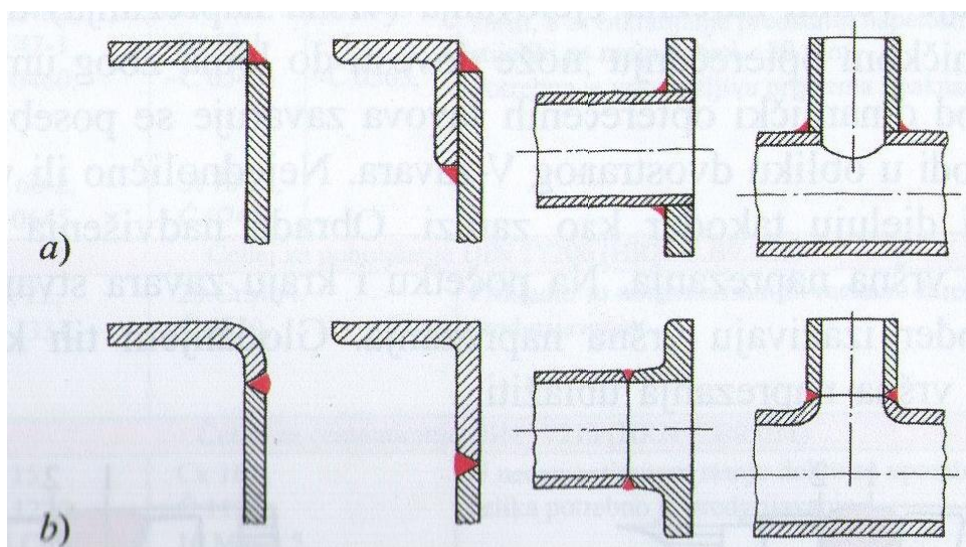
Na slici 9 prikazana je podjela naprezanja u zavaru pri skretanju toka sile.



Slika 9 Podjela naprezanja u zavaru pri skretanju toka sile [16]

a) u tupom spoju; b) u kutnom spoju.

Na slici 10 prikazano je kako se u zavarenim spojevima može izbjeći skretanje toka sile. Tupi zavar dinamički je izdržljiviji od kutnog, budući da u njemu nema skretanja toka sile.

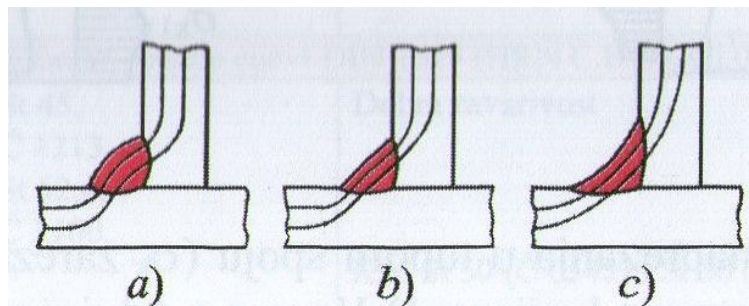


Slika 10 Oblikovanje zavarenih konstrukcija pri dinamičkom opterećenju [16]

a) nepravilno; b) pravilno.

Postoje situacije u kojima je nemoguće izbjeći kutni spoj. Kao rješenje ovdje se nameće udubljeni kutni zavar jer on ima najblaže skretanje toka silnica i zbog toga može podnijeti najveće dinamičko opterećenja. Međutim, često se u praksi prednost daje jeftinijem ravnom kutnom zavaru.

Na slici 11 prikazan je tok sila u kutnim zavarima.



Slika 11. Tok sila u kutnim zavarima [16]

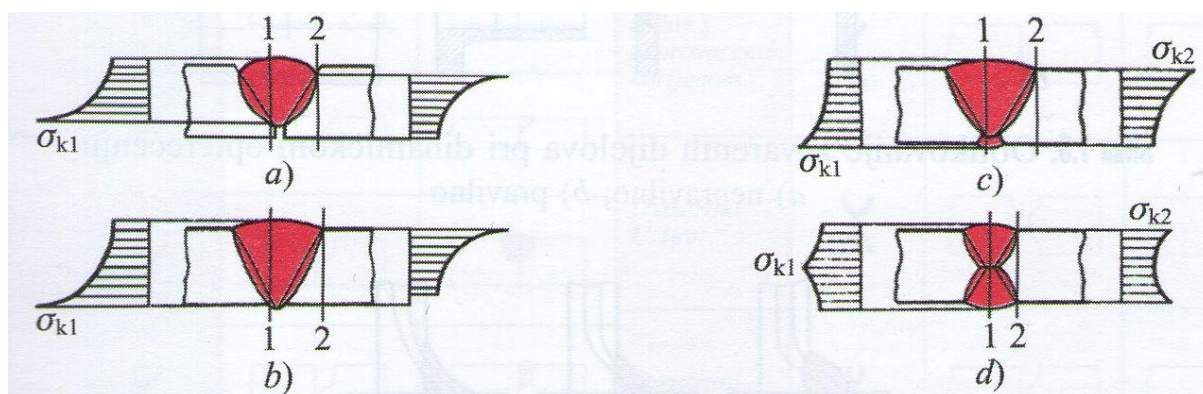
a) izbočen kutni zavar; b) plosnat kutni zavar; c) udubljen kutni zavar

2) Utjecaj zarezno djelovanja

Loš spoj osnovnog i dodatnog materijala uzrokuje velika zarezna djelovanja. Posebnu pozornost treba obratiti pri zavarivanju korijena jer je korijen najosjetljiviji dio konstrukcije. Uslijed dinamičkih napreznja korijen mora biti potpuno provaren inače je velika vjerojatnost nastanka loma konstrukcije zbog zamora materijala.

Također, neadekvatan izbor parametara zavarivanja može uzrokovati stvaranje ugorina i zajeda koji predstavljaju zarezna djelovanja, te kasnije u eksploataciji uzrokuju vršna napreznja. Ovu vrstu zarezno djelovanja možemo spriječiti prevlačenjem kritičnih mjesta TIG postupkom zavarivanja.

Na slici 12 prikazana je podjela napreznja u tupom spoju uslijed utjecaja zarezno djelovanja.



Slika 12 Podjela napreznja u tupom spoju (σ_k zarezno djelovanje) [16]

a) V-zavar s lošim provarom korijena; b) V-zavar s dobrim provarom korijena
c) V-zavar s pročišćenim i zavarenim korijenom; d) dvostrani V-zavar.

3) Izvedbu zavara

Kao što je poznato postoje razni oblici pripreme zavarenih spojeva (U, V, K, X,...). Ovisno o pojedinom obliku razlikuje se broj prolaza, a različiti broj prolaza daje i različiti unos topline u konstrukciju.

Unesena topline pri zavarivanju jedan je od važnijih čimbenika koji djeluje na svojstva zavarenog spoja. Vrlo često, proizvođači čelika daju preporuke za optimalnu količinu topline koja se unosi pri zavarivanju određenog čelika, na osnovi čega se mogu odrediti parametri zavarivanja (I , U i v_z), ovisno o pojedinom postupku zavarivanja iz relacije [8,17]:

$$E = \frac{U \times I \times \eta}{v_z} \times \frac{60}{1000} \text{ [kJ/cm]} \quad (1)$$

E – unesena topline, [kJ/cm],

I – jakost struje zavarivanja, [A],

U – napon zavarivanja, [V],

v_z – brzina zavarivanja, [cm/min],

η – koeficijent stvarno unesene topline ovisno o pojedinom postupku zavarivanja

3.3. Tehnološko stajalište zavarljivosti čelika (izvedbeno stajalište)

Tehnološke greške posljedica su loše propisane tehnologije zavarivanja ili što je češći slučaj u praksi, a to je da se kvalitetno propisana tehnologija zavarivanja ne provodi u potpunosti pri zavarivanju konstrukcije. Da bi se osiguralo provođenje propisane tehnologije zavarivanja kod odgovornijih zavarenih konstrukcija često puta je potreban nadzor i praćenje kako stabilnosti procesa zavarivanja, tako i kvalitete rada pojedinih zavarivača i pogona [17].

U ovom kontekstu tehnologija zavarivanja podrazumijeva kompletnu proceduru zavarivanja koja se sastoji od određenog postupka zavarivanja, vrste dodatnog materijala, odabranih parametara zavarivanja, predgrijavanja, broja prolaza, položaja zavarivanja i dr.

Razmotrit će se nekoliko najvažnijih dijelova tehnologije zavarivanja kada je riječ o zavarljivosti visokočvrstih čelika:

1) Vrsta dodatnog materijala

Najveći problem kod visokočvrstih čelika predstavljaju hladne pukotine (poglavlje 4.). Jedan od osnovnih razloga nastanka hladnih pukotina je vodik, znači da bi nastale hladne pukotine potrebno je u materijal unijeti vodik. Postoje razni načini kako vodik može dospjeti u materijal odnosno u MZ i u ZUT. Vrlo često je to iz dodatnog materijala. Kako bi minimizirali mogućnost nastanka hladnih pukotina, prije upotrebe, sušimo dodatni materijal

(elektrode i prašak). Zavarivanje visokočvrstih čelika preporuča se elektrodom s bazičnom oblogom jer sadrži najmanje vodika. Postoji posebna vrsta bazičnih elektroda koja se naziva „low hydrogen“ i sadrže manje od 5 ml vodika / 100 g zavara.

2) Predgrijavanje

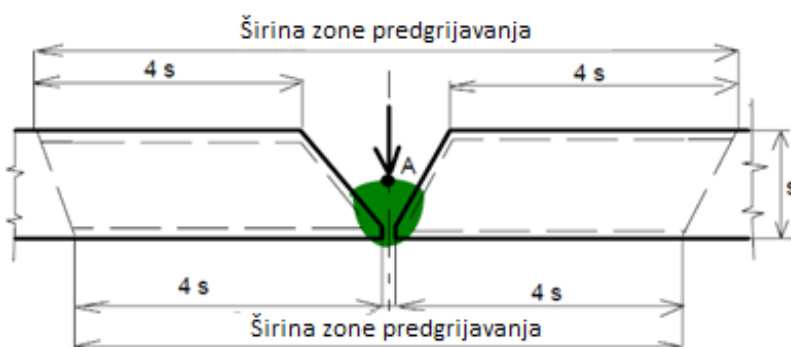
Na koju temperaturu je potrebno predgrijati konstrukciju i je li je uopće potrebno provesti predgrijavanje (ili je dovoljna temperatura metala, koja je jednaka temperaturi okoline) određuje se na temelju preporuka iz literature i iskustva, probama sklonosti hladnim pukotinama (Implant, Tekken) i atestom postupka [15]. Postoje i računske metode za određivanje minimalno potrebne temperature predgrijavanja. Za čelike visoke čvrstoće najpogodnija je metoda po autorima Ito - Bessyo.

Za visokočvrste čelike predgrijavanje se najčešće vrši u cilju izbjegavanja hladnih pukotina. Hladne pukotine uzrokuje krhka zakaljena struktura, difundirani vodik i reakcija zaostalih naprezanja. Predgrijavanjem postizemo smanjenje brzine hlađenja ZUT i MZ (tako smanjujemo količine tvrdih faza) i omogućujemo izlazak difuzijskog vodika (atomarni difuzijski vodik lakše difundira kroz metalnu kristalnu rešetku pri višim temperaturama) [15]. Predgrijavanjem se također smanjuju zaostala naprezanja.

Kod visokočvrstih mikrolegiranih i niskolegiranih čelika temperatura predgrijavanja T_{pred} nesmije biti niti suviše visoka, niti niska, nego se mora držati u strogim granicama $T_{\text{pred min}}$ i $T_{\text{pred max}}$. Iznos temperature predgrijavanja ovisi o kemijskom sastavu čelika, količini unešene topline i debljini materijala.

Treba obratiti pozornost i na temperaturu između prolaza T_m . Kontrolira se neposredno prije zavarivanja slijedećeg prolaza (slika 12) u točki A. T_m je ustvari maksimalna dopuštena temperatura predgrijavanja $T_{\text{pred max}}$ [15]. Greške koje nastaju nedovoljnim predgrijavanjem ne mogu se popraviti naknadnom toplinskom obradom!

Na slici 13 prikazana je širina zone predgrijavanja.



Mjereći od ruba žlijeba preporučuje se širina predgrijavanja na svaku stranu 4 debljine, ali ne više od 30 mm.

Za debljine preko 50 mm treba posebno odrediti širinu zone predgrijavanja.

Slika 13 Širina zone predgrijavanja [15].

3) Obrada nakon zavarivanja

Iako se toplinska obrada nakon zavarivanja nastoji izbjeći zbog porasta troškova, postoje trenuci u kojima je ona neizbježna.

Zbog toplinske obrade zavarenog spoja mogu nastati pukotine. Najčešće nastaju u tzv. niskotemperaturnom području zbog prevelike brzine zagrijavanja i pri naglom hlađenju zavarenog spoja.

Također, nakon zavarivanja moguće je provesti mehaničku, kemijsku ili elektrokemijsku obradu kako bi se sa površine uklonili toplinski oksidi i time uklonila mogućnost nastanka korozijskog oštećenja.

4. POGREŠKE U ZAVARENIM SPOJEVIMA

Problemu pojave grešaka u zavarenom spoju potrebno je posvetiti mnogo pažnje zbog posljedica koje one mogu prouzročiti, od kojih je najgora otkaz zavarenog spoja. Pogreške u zavarenim spojevima, prema preporukama „Međunarodnog instituta za zavarivanje“ (IIW = International Institute of Welding), klasificirane su u šest osnovnih grupa, sukladno prema normama HRN EN ISO 6520-1:2008 [18]:

Tablica 1. Klasifikacija pogrešaka u zavarenim spojevima [18]

Osnovna grupa	Oznaka grupe	Vrsta pogreške
1	100	Pukotine
2	200	Poroznosti
3	300	Uključine
4	400	Nedovoljno protaljivanje
5	500	Nepravilnosti oblika
6	600	Ostale pogreške

Pukotine su daleko najopasnije greške u izradi zavarenih konstrukcija, te se najviše pažnje posvećuje sprječavanju njihovog nastajanja.

Pukotine najčešće mogu biti [15]:

- Hladne (cold cracking, hydrogen induced cracking, delayed cracking);
- Tople (hot crackinig);
- Uslijed naknadne toplinske obrade (post weld heat treatment cracking);
- Uslijed slojastog ili lamelnog odvajanja (lamelar tearing).

U ovom seminarskom radu detaljno će se razraditi hladne pukotine u zoni zavarenog spoja jer su one najveći problem kada govorimo o zavarljivosti visokočvrstih čelika.

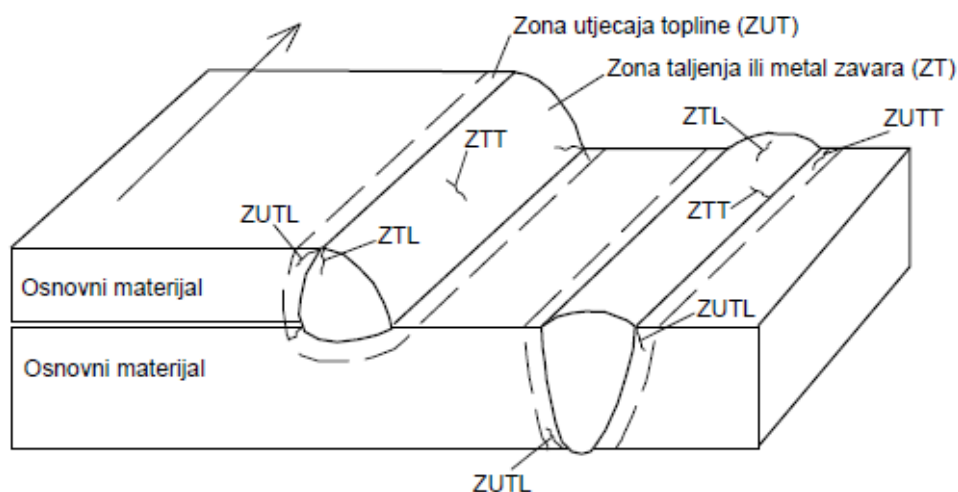
4.1. Hladne pukotine

Hladne pukotine nastaju pri hlađenju zavarenog spoja ispod 300 °C, a mogu nastati i nekoliko dana nakon zavarivanja, pa su stoga dobile i naziv „zakašnjele“ pukotine (delayed cracking). Zbog toga, kontrolu kvalitete metodama bez razaranja (ultrazvuk, penetranti i dr.) potrebno je provoditi barem 48 sati nakon zavarivanja [15].

Hladne pukotine mogu nastati u metalu zavora i u osnovnom materijalu odnosno u zoni utjecaja topline. Mogu biti orijentirane u smjeru uzdužne osi zavarenog spoja, okomito ili pod nekim kutem u odnosu na uzdužnu os zavarenog spoja [14,15].

Kod visokočvrstih čelika ZUT je otporniji na pojavu hladnih pukotina od područja metala zavora. Naime, metal zavora je više legiran i karakterizira ga heterogena mikrostruktura, stoga se ne mogu primijeniti smjernice za izbjegavanje hladnih pukotina za ZUT i na područje metala zavora. Sklonost metala zavora prema hladnim pukotinama raste s povećanjem čvrstoće čelika, udjela vodika i debljine radnog komada [10].

Na slici 14 prikazana je lokacija i orijentacija hladnih pukotina prema IIW.



Slika 14 Lokacije i orijentacije hladnih pukotina prema IIW (International Institute of Welding) [15].

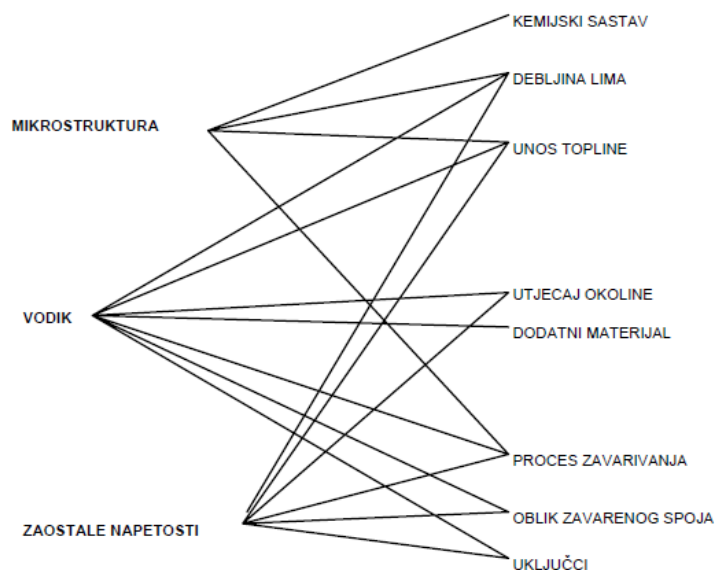
4.1.1. Uzroci nastajanja hladnih pukotina

Tri su osnovna uzroka nastajanja hladnih pukotina [15,19]:

- 1) Utjecaj strukture na nastanak hladnih pukotina - sklonost materijala prema zakaljivanju (ocjenjuje se preko različitih eksperimentalno dobivenih formula za ekvivalent ugljika i mjerenjem tvrdoće HV10);
- 2) Postojanje zaostalih naprezanja (procjenjuje se s obzirom na debljinu materijala, oblik i položaj zavarivanja i količinu unešene energije);
- 3) Količini difuzijskog vodika (ako je u zavarenom spoju tijekom zavarivanja postojao vodik koji nakon zavarivanja nije izašao van; može se mjeriti, npr. glicerinskom metodom).

Za nastajanje hladnih pukotina nužna su sva tri navedena uzročnika, a vjerojatnost nastajanja je tim veća što je veći njihov utjecaj [15].

Na slici 15 prikazani su utjecajni čimbenici nastanka hladnih pukotina.



Slika 15 Utjecajni čimbenici nastanka hladnih pukotina [15].

4.1.1.1. Utjecaj strukture na nastanak hladnih pukotina

Zbog pukotina induciranih vodikom dolazi do krhkog loma inače duktilnih materijala pri kontinuiranom opterećenju i pri naprezanju nižem od granice tečenja [11].

Ovisnost mehanizma nastanka hladnih pukotina o kristalnoj strukturi govori o različitoj rastvorljivosti vodika u različitim kristalnim strukturama (ferit, austenit). Naime, austenitna struktura (γ) ima FCC rešetku, dok feritna struktura (α) ima BCC rešetku. Zbog većeg razmaka između atoma BCC kristalne rešetke, vodik se omogućava veća mobilnost. Atomarni vodik ima manju difuznost kroz FCC rešetku, nego kroz BCC rešetku. Stoga je veća rastvorljivost vodika u FCC rešetci, nego u BCC rešetci. Vodik je najmanji atom, pa je sam po sebi već rastvorljiv u željezu. Općenito vrijedi da oktaederska i tetraedarska kristalna rešetka predstavljaju potencijalne zamke za intersticije. Zbog razlike u veličini FCC i BCC intersticijskih mjesta rastvorljivost vodika u željezu mijenja se i s temperaturom [10].

Ovisnost mehanizma nastajanja hladnih pukotina o mikrostrukturi ukazuje na to da su martenzitni čelici osjetljiviji na pojavu hladnih pukotina od feritnih čelika, ali martenzitna mikrostruktura nije nužan preduvjet za nastanak pukotina. Literatura navodi kako feritni čelici pokazuju veću sklonost prema hladnim pukotinama od austenitnih čelika, pogotovo u grubozrnatoj strukturi zone utjecaja topline [10].

4.1.1.2. Utjecaj naprezanja

Naprezanja koja se razmatraju pri istraživanju hladnih pukotina mogu se podijeliti u tri skupine, ovisno o uzrocima njihova nastanka [20]:

- Izravna;
- Neizravna;
- Vanjska.

Izravna naprezanja djeluju lokalno u blizini zavarenog spoja. Posljedica su brzog lokalnog zagrijavanja i hlađenja spoja. Nastaju zbog postojanja temperaturnog gradijenta u materijalu koji se zavaruje, čemu se još dodaju i naprezanja zbog utjecaja strukturnih pretvorbi [7].

Neizravna naprezanja (naprezanja zbog solidifikacije materijala) nastaju prilikom zavarivanja zbog vanjskih ukrućenja. Njima se može do određenog stupnja upravljati u fazi konstruiranja [7].

Vanjska naprezanja su ona koja se javljaju tijekom izradbe i koja mogu djelovati na zavareni spoj tijekom zavarivanja. Uzrokovana su: težinom dijelova koji se spajaju, elastičnim vezama među dijelovima, iskrivljenjem zbog drugih nanesenih zavara u procesu, hlađenjem i dr [7].

4.1.1.3. Utjecaj difuzijskog vodika

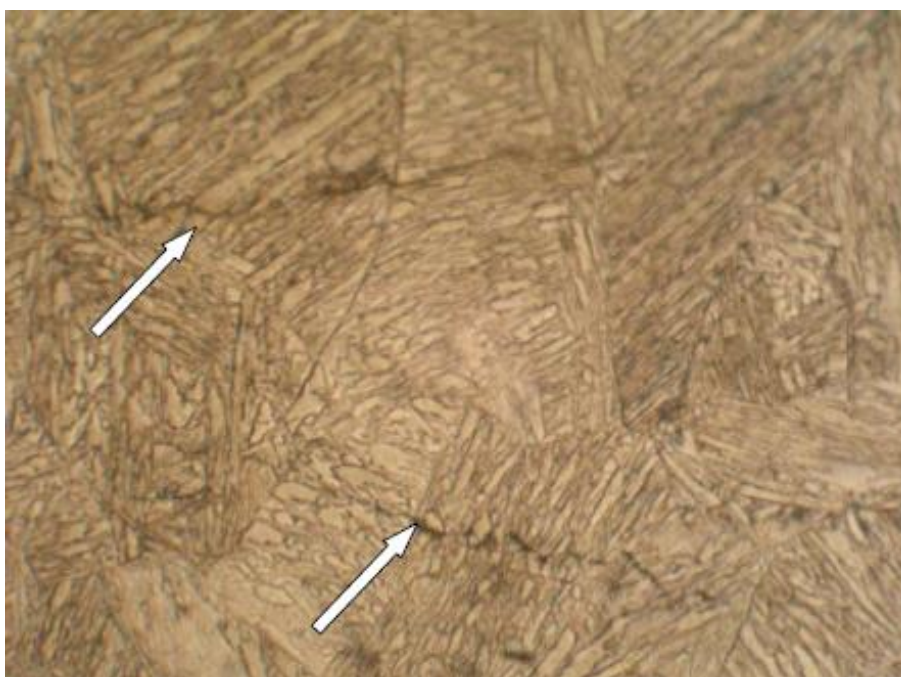
Utjecaj vodika se može klasificirati u dvije glavne grupe [10]:

1. Kvazi-krhki lom visokočvrstih materijala koji se može pojaviti kod relativno niskih koncentracija vodika; ova se pojava naziva vodikovom krhkosti.
2. Pojava mjehurića (engl. *blister*) na površini i unutrašnje pucanje na mjestima uz sulfidne ili ostale uključke.

Dosadašnja istraživanja upućivala su na martenzit kao najosjetljiviju strukturu za pojavu hladnih pukotina u zoni metala zavara. Međutim, visokočvrsti čelici, zbog manjeg udjela ugljika neće stvoriti veliku količinu martenzita, a i dalje su osjetljivi na pojavu hladnih pukotina. Stoga se postavlja pitanje djelovanja ostalih mikrostrukturnih konstituenata na zarobljavanje vodika i povećavanja sklonosti hladnim pukotinama. U literaturi se navodi i zaostali austenit (ili M/A konstituent) kao zamka za vodik. Naime, pri ciklusu hlađenja visokočvrstih čelika, dio zaostalog austenita je neizbježna pojava. Vodik u austenitu ima vrlo nisku difuznost, a vrlo visoku topivost. Također, mikrostruktura visokočvrstih čelika je mješavina ferita, martenzita, bainita i ima vrlo veliku difuznost i malu topivost vodika. Upravo te razlike u transportu vodika kroz različite mikrostrukturne konstituente stvaraju uvjete za zarobljavanje vodika u zaostalom austenitu, čime isti može djelovati kao privremena ili trajna zamka. U literaturi se navodi kako zaostali austenit može predstavljati kontinuirani izvor vodika prema martenzitnoj matrici u cijelom životnom vijeku. Naime, zaostali austenit je vrlo nestabilna mikrostruktura koja se pri najmanjim promjenama radnih temperatura ili plastičnog naprezanja može promijeniti u martenzit. Takva pojava rezultira zatim vrlo velikim

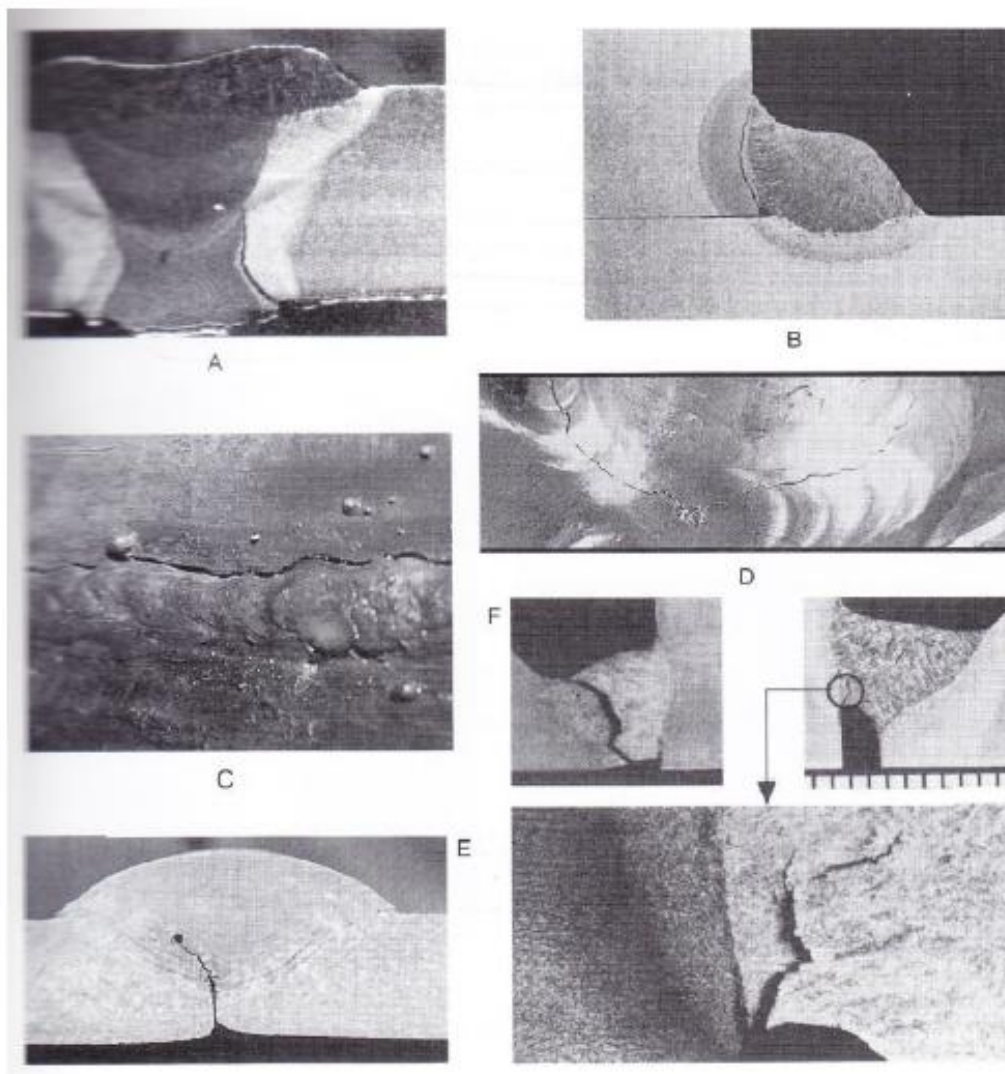
oslobađanjem difundiranog vodika u martenzitnu mikrostrukturu što zatim povećava sklonost pojavi hladnih pukotina [10].

Na slici 16 prikazan je paralelni niz pukotina u grubozrnatom ZUT-u, uvećan 1000x.



Slika 16 Paralelni niz pukotina u grubozrnatom ZUT-u, povećanje 1000x [11].

Na slici 17 prikazane su karakteristične hladne pukotine u području zavarenih spojeva.



Slika 17 Karakteristične hladne pukotine u području zavarenih spojeva [10,18]:

- A - sučeljeni spoj: pukotina u ZUT-u;
- B - kutni spoj: pukotina u ZUT-u;
- C - sučeljeni spoj: pukotina u ZUT-u;
- D - kutni spoj: pukotina u zavaru;
- E - sučeljeni spoj: pukotina iz neprovarenog korijena zavara;
- F - kutni spoj: pukotina u korijenu zavara.

5. METODE ISPITIVANJA ZAVARLJIVOSTI

U načelu, kvalitetan kriterij ispitivanja zavarljivosti morao bi omogućiti korisniku da odabere kombinaciju čelika, dodatnog materijala i postupka zavarivanja koji bi osigurali dovoljan stupanj sigurnosti od pojave vodikovih pukotina uz minimalni trošak. Uz to, ispitivanjem bi se morao razlučiti utjecaj svakog utjecajnog faktora koji može dovesti do pojave pukotina [11].

Kao što je navedeno u poglavlju 3., ne postoji metoda ispitivanja koja bi jednoznačno odredila problem zavarljivosti čelika. Zbog toga, za ispitivanje i ocjenu zavarljivosti, koristi se niz raznih eksperimentalnih metoda od kojih svaka služi za određivanje specifičnih svojstava.

Tako se kod visokočvrstih čelika koristi Implant i Tekken test kako bi se ispitala sklonost materijala prema nastajanju hladnih pukotina. Također, zavarljivost se ispituje i s metalurškog stajališta pomoću ekvivalenta ugljika dok se veličina temperature predgrijavanja ispituje pomoću računskih i eksperimentalnih metoda.

5.1. Ekvivalent ugljika

Metalurška zavarljivost čelika se često izražava ekvivalentom ugljika koji se dobije izračunavanjem po određenim formulama, pri čemu svi kemijski elementi koji čine kemijski sastav čelika u različitim stupnjevima utječu na njegov iznos [17].

Postoji nekoliko desetaka različitih formula za određivanje ekvivalenta ugljika. Ovisno o materijalu kojeg zavarujemo koristimo određenu formulu. Tako je za zavarivanje visokočvrstih čelika najprikladnije koristiti formulu prema autorima Ito - Bessyo.

U sljedećoj tablici prikazano je nekoliko različitih formula za izračun ekvivalenta ugljika. Velika većina tih formula dobivena je eksperimentalno.

Tablica 2. Formule za izračun ekvivalenta ugljika [8]

Metoda	Eksperimentalna formula	Korelacija sa pojavom pukotina
$C_{eq}(WES, JIS)$	$C_{ekv}(WES, JIS) = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{4}$	72,2 %
$CE(IIW)$	$C_{ekv}(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{5}$	78,1 %
Graville	$C_{ekv}(Graville) = C + \frac{Mn}{16} + \frac{Ni}{50} + \frac{Cr}{23} + \frac{Mo}{7} + \frac{Nb}{8} + \frac{V}{9}$	82,6 %
Tanaka	$C_{ekv}(Pn - Tanaka) = C + \frac{Si}{20} + \frac{Mn}{10} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{30} + \frac{Mo}{20}$	82,8 %
Düren	$C_{ekv}(Dueren) = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn}{16} + \frac{Cu}{16} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{40} + \frac{V}{15}$	84,0 %
Ito-Bessyo	$C_{ekv}(Ito - Bessyo, P_{cm}) = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B$	84,9 %
Stout	$C_{ekv}(Stout) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{40} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{10}$	86,6 %
CEN	$C_{ekv}(CEN) = C + A(C) \cdot \left(\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} + 5 \cdot B \right)$ $A(C) = 0,75 + 0,25 \cdot \tanh[20 \cdot (C - 0,12)]$	91,1 %

Ovisno o dobivenom iznosu ekvivalenta ugljika C_{ekv} procjenjuje se zavarljivost [8].

$C_{ekv} < 0,25 \rightarrow$ dobra zavarljivost

$0,25 < C_{ekv} \leq 0,35 \rightarrow$ zadovoljavajuća zavarljivost

$0,35 < C_{ekv} \leq 0,45 \rightarrow$ ograničena zavarljivost

$C_{ekv} > 0,45 \rightarrow$ vrlo loša zavarljivost

Osim izračunavanja ekvivalenta ugljika, kod visokočvrstih čelika, potrebno je dodatnim ispitivanjima donijeti ocjenu o njihovoj zavarljivosti, jer uz jednaki ekvivalent ugljika, kod različitih debljina i sadržaja vodika u zavaru, pokazuju različitu osjetljivost prema hladnim

pukotinama [17]. Stoga je potrebno provesti, uz izračun ekvivalenta ugljika, neku od sljedećih metoda.

5.2. Implant test

Implant metoda ispitivanja je najprikladnija metoda za ispitivanje nastanka hladnih pukotina zbog [10]:

- Jednostavnosti izvođenja eksperimenta;
- Implant uzorak prolazi kroz sve toplinske cikluse kao i osnovni materijal;
- Postupak predgrijavanja i naknadne toplinske obrade isti je kao i kod zavarivanja u realnim uvjetima;
- Iz malog uzorka moguće je sakupiti veliku količinu podataka (kritično implant naprezanje, izgled zone zavora sa zonom utjecaja topline i metalom zavora, mikroanalizu uzoraka, makroizbruske,...).

Ispitivanje se provodi s ciljem utvrđivanja sklonosti materijala prema hladnim pukotinama u ispitnim radnim uvjetima. Implant ispitivanje daje kvantitativan rezultat (postoje li pukotine ili ne) [10].

Implant uzorak ima narezan navoj s obje strane, te se kao takav polaže u provrt na položenoj osnovnoj ploči gdje navoj ima funkciju mnogostrukih zareza koji djeluju kao koncentratori naprezanja. Navoj na drugom kraju uređaja koristi se za pričvršćivanje u implant uređaj za ispitivanje [10].

Nakon pozicioniranja radnog komada i pištolja za zavarivanje s kontroliranom udaljenosti sapnice od ranog komada u iznosu od 15 mm, polaže se zavar na ispitnoj ploči. Zavar ide preko Implant ploče i prelazi preko Implant uzorka zavarujući ga tako na položenu ploču, slika 19. Nakon pozicioniranja Implant uzorka u uređaj i Implant položenu ploču, te polaganja zavora, potrebno je opteretiti uzorak s određenom silom, koja se određuje prema granici razvlačenja i vlačnoj čvrstoći osnovnog materijala [10].

Na slici 18 prikazan je Implant uzorak s obostranim navojem.



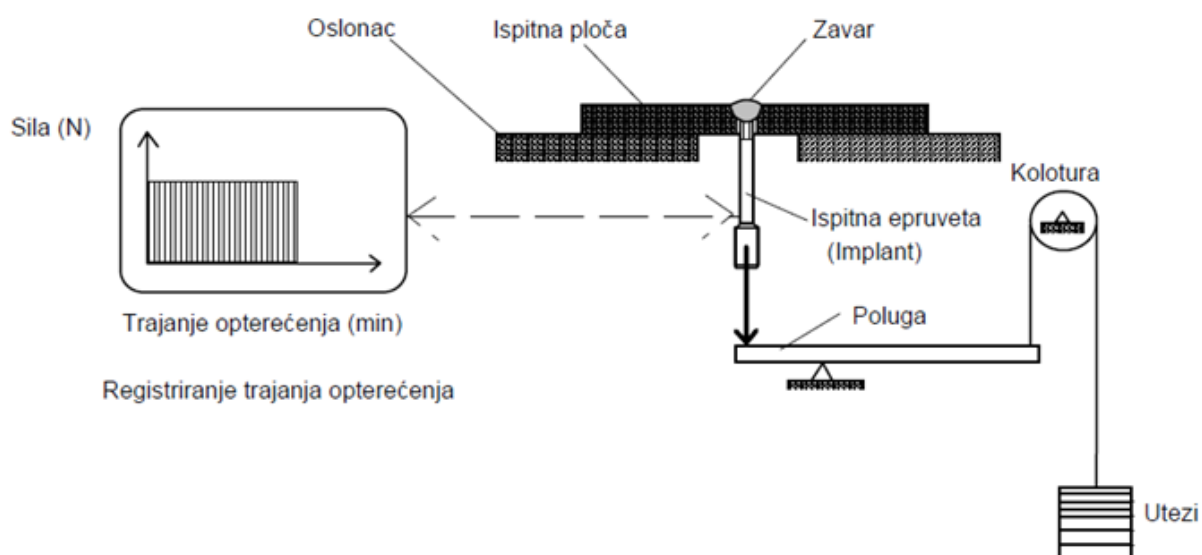
Slika 18 Implant uzorak s obostranim navojem [10].

Na slici 19 prikazan je navar na Implant pločama.



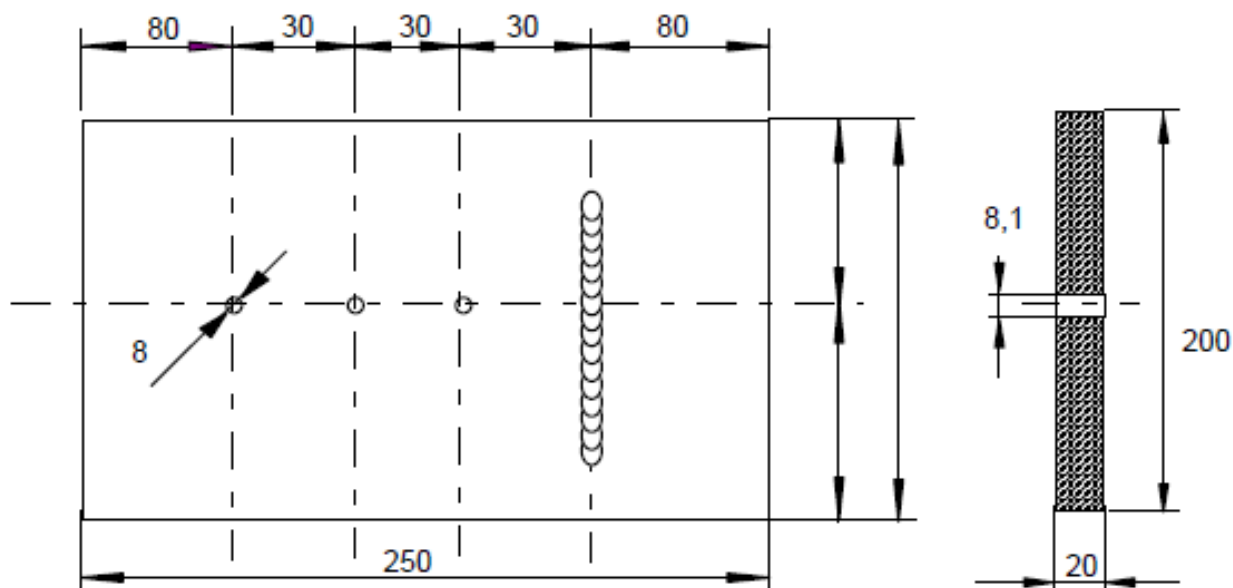
Slika 19 Prikaz navara na Implant pločama [10].

Na slici 20 shematski je prikazan uređaj za ispitivanje nastanka hladnih pukotina po Implant metodi.



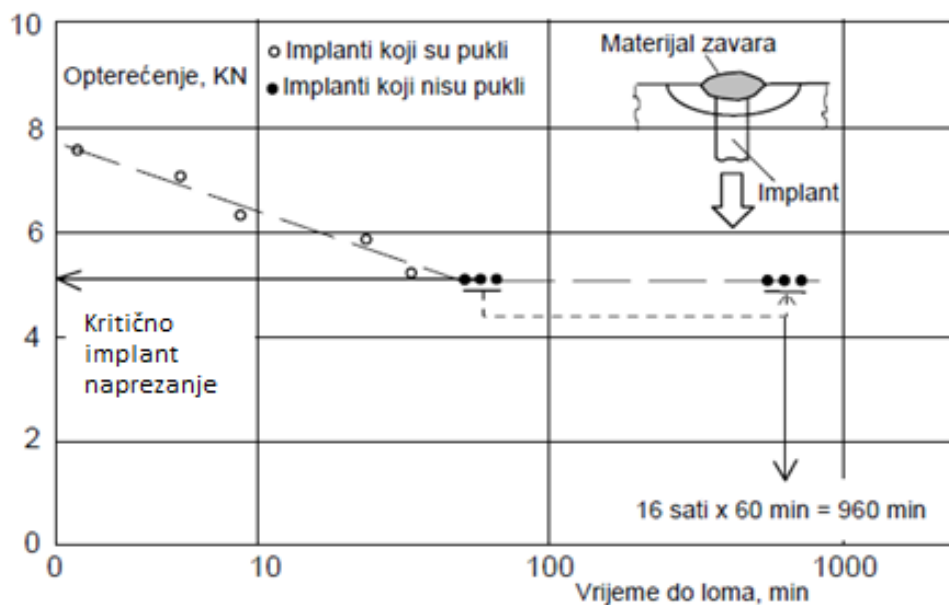
Slika 20 Shematski prikaz uređaja za ispitivanje po Implant metodi [15].

Na slici 21 prikazan je izgled ispitne ploče za ispitivanje po Implant metodi.



Slika 21 Izgled ispitne ploče za ispitivanje po Implant metodi [15].

Na slici 22 dan je dijagram opterećenja implant (epruveta) tijekom vremena.



Slika 22 Dijagram opterećenja implant (epruveta) tijekom vremena do loma [15].

Kada se opterećenje podijeli sa površinom poprečnog presjeka implanta - epruvete, dobiju se vrijednosti implantacijskog naprezanja. Ono naprezanje kod kojeg dolazi do loma implanta

naziva se kritično Implant naprezanje. Poželjno je da je ono što više, jer je tada bolja zavarljivost materijala. Kako se povećava sadržaj difuzijskog vodika, razina zaostalih napetosti i zakaljivosti materijala, do loma epruvete dolazi ranije i kod nižih naprezanja. U tim je slučajevima kritično Implant naprezanje niže, što je nepovoljno jer znači slabiju zavarljivost.

5.3. Tekken metoda

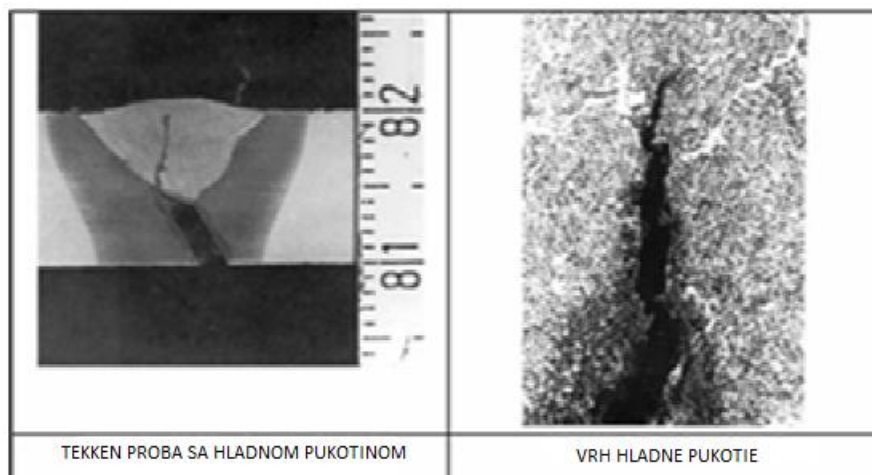
Ova metoda ispitivanja može se koristiti kao tehnološko ispitivanje pri postupku elektrolučnog zavarivanja i zavarivanja pod praškom za relativno tanke limove (12 mm) i za one debljine do 150 mm [7]. Ispitivanjem dobivamo kvantitativne pokazatelje, tj. ima li ili nema pukotina uz određenu tehnologiju i uvjete zavarivanja [15].

Uzorak se najčešće priprema od dvije međusobno zavarene ploče, pri čemu zazor u korijenu Y spoja treba biti 2 mm. Pukotine se najčešće javljaju od prijelazne zone do ZUT-a, što ukazuje na to da je pogodno za razlikovanje raznih osnovnih materijala [7].

Procedura izvođenja Tekken testa [7]:

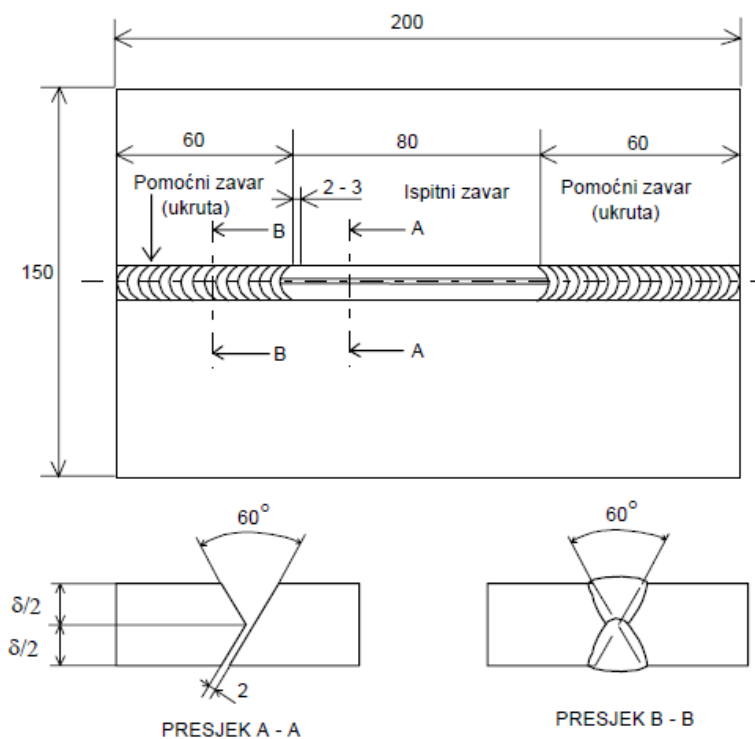
- Prvo se zavare pomoćni zavari, a tek onda ispitni zavar - pomoćnim zavarima ploča je ukružena (nema stezanja niti rastezanja);
- Epruvetu je potrebno ostaviti 48 sati i nakon toga se ispituje;
- Ispitivanje se prvo vrši vizualnim pregledom, zatim penetrantskim tekućinama, a zatim se zavar reže na tri mjesta, rade se izbrusci i promatraju se mikroskopom;
- U ovisnosti o duljini i visini pukotina zaključujemo o sklonosti prema hladnim pukotinama.

Na slici 23 prikazana je pukotina uzrokovana vodikom dobivena Tekken metodom.



Slika 23 Pukotina uzrokovana vodikom [7].

Na slici 24 dan je shematski prikaz sklonosti prema hladnim pukotinama po Tekken metodi.



Slika 24 Shematski prikaz sklonosti hladnim pukotinama po Tekken metodi [15].

6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada analitičkim metodama interpretacije ekvivalenta ugljika ispitana je zavarljivost dvije vrste visokočvrstih čelika gradacije X70 i X80 prema API 5L standardu. U razmatranje su uzeta tri različita postupka zavarivanja: MAG, REL (bazična elektroda) i FCAW (rutilni prašak). Uz pretpostavku dva različita unosa topline (1 i 3 [kJ/mm]) i dvije različite debljine materijala (10 i 30 [mm]) izračunana je temperatura predgrijavanja.

Za ispitivanje zavarljivosti koristit će se dvije metode ekvivalenta ugljika - prema autorima Ito-Bessyo i prema normi HRN EN 1011-2.

Zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava i dobre zavarljivosti navedeni čelici svoju najširu primjenu nalaze kod izgradnje cjevovoda, te u manjoj mjeri i u off-shore postrojenjima [21]. Godišnja proizvodnja cijevi iznosi više od 8 milijuna tona, pri čemu su čelici gradacije X70 i X80 najviše zastupljeni [11]. Taj podatak dovoljno govori o njihovom značaju u industriji i o daljnjem razvoju tehnologije zavarivanja za navedenu vrstu čelika.

6.1. Ito-Bessyo formula

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2)$$

$$P_w = P_{cm} + \frac{HD}{60} + \frac{d}{600} \quad (3)$$

$$T_p = 1440 \times P_w - 392 \quad (4)$$

Gdje su:

P_w [%] - parametar sklonosti pukotinama,

H_D [ml H_2 / 100 g zavara] - sadržaj difuzijskog vodika u dodatnom materijalu,

d [mm] - debljina osnovnog materijala,

P_{cm} [%] - ekvivalent ugljika prema Ito-Bessyo,

T_p [°C] - temperatura predgrijavanja.

6.2. Formula prema normi HRN EN 1011-2

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (5)$$

$$T_p = 697 \times CET + 160 \times \tanh(d/35) + 62 \times HD^{0,35} + (53 \times CET - 32) \times Q - 328 \quad (6)$$

Gdje su:

CET [%] - ekvivalent ugljika prema normi HRN EN 1011-2,

d [mm] - debljina osnovnog materijala,

H_D [ml H_2 / 100 g zavara] - sadržaj difuzijskog vodika u dodatnom materijalu,

T_p [°C] - temperatura predgrijavanja.

6.3. API 5L X70

Tablica 3. Kemijski sastav čelika API 5L X70

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Nb	V
Maseni udio, %	0,091	0,3	1,72	0,011	0,001	0,03	0,03	0,12	0,025	0,05	0,06
Zahtjev prema normi API 5L max, %	0,22	-	1,65	0,025	-	-	-	-	-	-	-

Tablica 4. Zahtjevi za mehanička svojstva čelika X70 prema normi API 5L [11]

Gradacija čelika	Granica razvlačenja $R_{e \min}$ N/mm ²	Granica razvlačenja $R_{e \max}$ N/mm ²	Vlačna čvrstoća $R_{m \min}$ N/mm ²	Vlačna čvrstoća $R_{m \max}$ N/mm ²
X70	483	621	565	758

Iz navedenih mehaničkih svojstava čelika X70 vidljivo je da se radi o čeliku povišene, odnosno visoke čvrstoće.

Ovisno o postupku zavarivanja odabrani su različiti iznosi difuzijskog vodika. Tako je za MAG postupak odabran iznos difuzijskog vodika 1 [ml H_2 / 100 g zavara], za REL postupak s bazičnom elektrodom 5 [ml H_2 / 100 g zavara] dok je za FCAW postupak s rutilnim praškom odabran iznos od 10 [ml H_2 / 100 g zavara]. Veličine iznosa difuzijskog vodika odabrane su sukladno najčešćim iznosima u praksi za pojedini postupak.

Tablica 5. Vrijednosti temperatura predgrijavanja za čelik X70 prema Ito-Bessyo formuli

ITO-BESSYO		X70			
Debljina [mm]		10		30	
Unos topline [kJ/mm]		1	3	1	3
Postupak zavarivanja	MAG	-51,68	-51,68	-3,68	-3,68
	REL (B)	44,32	44,32	92,32	92,32
	FCAW (R)	164,32	164,32	212,32	212,32

Tablica 6. Vrijednosti temperatura predgrijavanja za čelik X70 prema HRN EN 1011-2

HRN EN 1011-2		X70			
Debljina [mm]		10		30	
Unos topline [kJ/mm]		1	3	1	3
Postupak zavarivanja	MAG	-45,55	-80,16	21,10	-13,51
	REL (B)	1,35	-33,26	68,00	33,92
	FCAW (R)	31,25	-3,36	97,90	63,29

6.4. API 5L X80

Tablica 7. Kemijski sastav čelika API 5L X80 prema atestu i laboratorijskom ispitivanju

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
Maseni udio, %	0,07	0,35	1,94	0,015	0,00	0,15	0,01	0,001	0,01	0,027
Atest	0,065	0,33	1,97	0,015	0,0004	0,17	0,018	0,002	0,009	-
Zahtjev prema normi API 5L max, %	0,24	-	1,4	0,025	0,015	-	-	-	-	-

Tablica 8. Mehanička svojstva materijala API 5L X80 [10]

Gradacija čelika	Granica razvlačenja $R_{e min} N/mm^2$	Granica razvlačenja $R_{e max} N/mm^2$	Vlačna čvrstoća $R_{m min} N/mm^2$	Vlačna čvrstoća $R_{m max} N/mm^2$
X80	552	690	621	827
X80 prema atestu	557		650	

Iznosi difuzijskog vodika isti su kao i u prethodnom primjeru.

Tablica 9. Vrijednosti temperatura predgrijavanja za čelik X80 prema Ito-Bessyo formuli

ITO-BESSYO		X80			
Debljina [mm]		10		30	
Unos topline [kJ/mm]		1	3	1	3
Postupak zavarivanja	MAG	-74,86	-74,86	-26,86	-26,86
	REL (B)	21,14	21,14	69,14	69,14
	FCAW (R)	141,14	141,14	173,00	173,00

Tablica 10. Vrijednosti temperatura predgrijavanja za čelik X80 prema HRN EN 1011-2

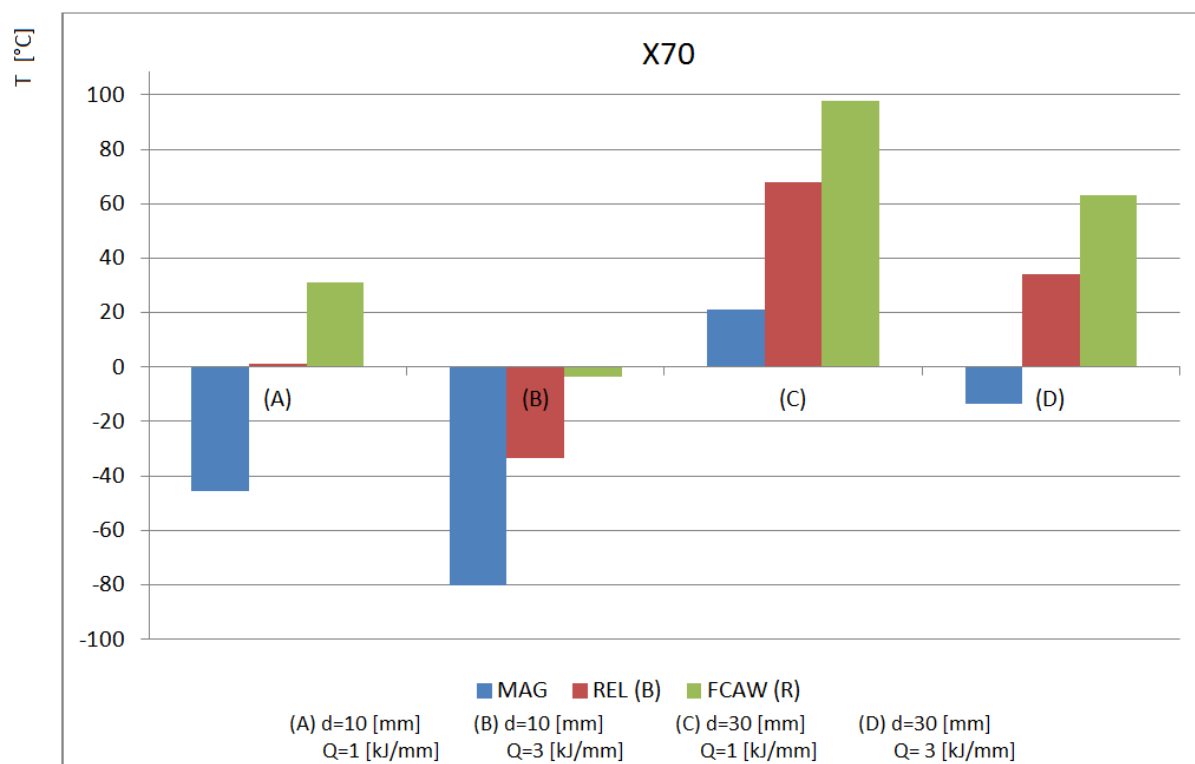
HRN EN 1011-2		X80			
Debljina [mm]		10		30	
Unos topline [kJ/mm]		1	3	1	3
Postupak zavarivanja	MAG	-49,23	-84,36	17,43	-17,70
	REL (B)	-2,33	-37,46	64,33	29,20
	FCAW (R)	27,57	-7,56	94,23	59,10

7. ANALIZA REZULTATA

Iz dobivenih rezultata vidljiva je velika razlika u temperaturi predgrijavanja prema Ito-Bessyo formuli u odnosu na normu HRN EN 1011-2. Razlog tome je taj što formula Ito-Bessyo uopće ne uzima u obzir toplinu unešenu predgrijavanjem, što je u realnim uvjetima zavarivanja vrlo važna činjenica. Razlika u dobivenim rezultatima je i zbog toga što HRN EN 1011-2 ne sadrži kemijske elemente silicij i vanadij.

Ovdje će se razmotriti rezultati dobiveni normom HRN EN 1011-2.

Na slici 25 u dijagramu je prikazana ovisnost promjene temperature predgrijavanja o debljini radnog komada i unosu topline za čelik API 5L X70.



Slika 25 Ovisnost temperature predgrijavanja o faktorima (d i Q) za API 5L X70.

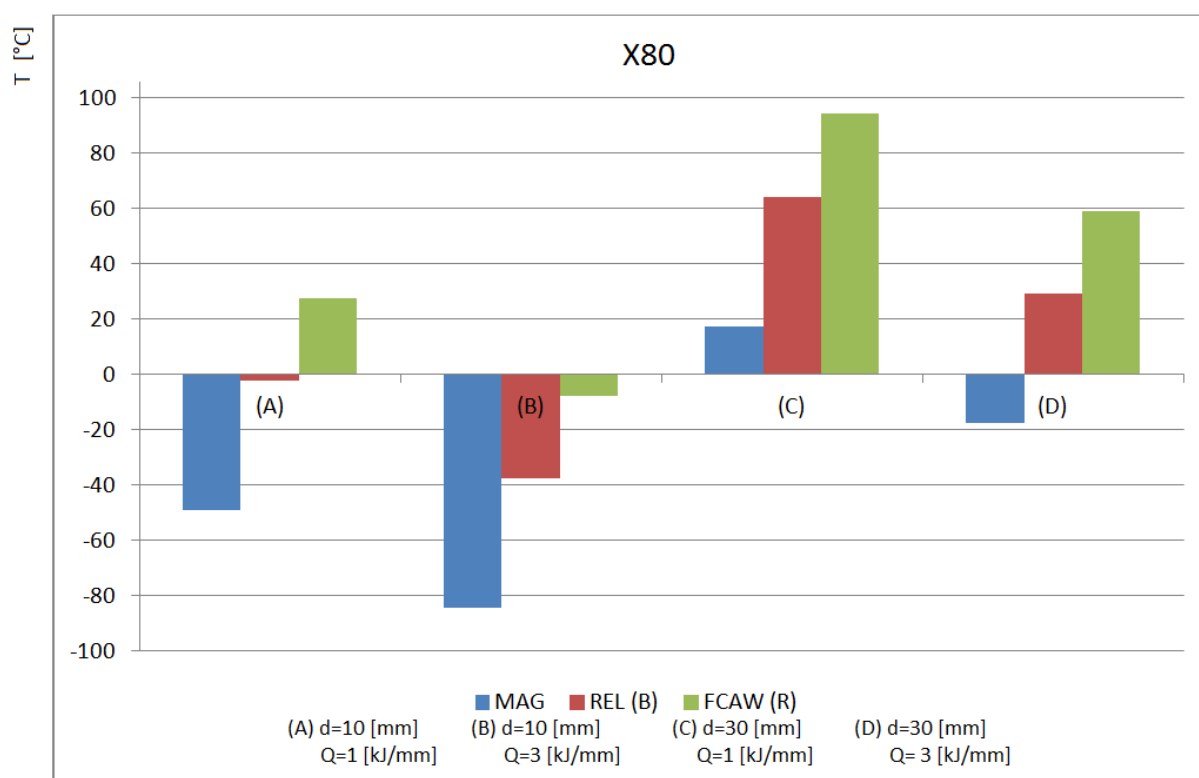
Iz dobivenih rezultata vidljivo je da predgrijavanje nije potrebno za MAG postupak osim za slučaj (C) – $d = 30$ [mm]; $Q = 1$ [kJ/mm]. Naime, poznato je da elektroda za MAG zavarivanje nema nikakvu oblogu, te je samim time minimizirana mogućnost ulaska vodika u metal zavara što je ujedno i razlog najmanjem iznosu difundiranog vodika H_D u usporedbi s ostalim postupcima zavarivanja.

Pogledamo li rezultate dobivene za REL postupak zavarivanja s bazičnom elektrodom vidimo da je predgrijavanje potrebno za slučaj (C) – $d = 30$ [mm]; $Q = 1$ [kJ/mm] u iznosu od 68 °C i za slučaj (D) – $d = 30$ [mm]; $Q = 3$ [kJ/mm] u iznosu od 34 °C. Temperatura predgrijavanja je

manja u slučaju (D) zbog toga što povećani unos topline kompenzira temperaturu predgrijavanja.

Kod FCAW postupka s rutilnim praškom predgrijavanje je potrebno u svim slučajevima osim u slučaju (B). Vidimo da je temperatura predgrijavanja veća u odnosu na REL bazičnu elektrodu. Razlog tome je velika količina difundiranog vodika koji se nalazi u prašku. Ponekad ona prelazi i 15 ml H₂ /100 g zavara, te je stoga potrebno sušiti elektrode prije upotrebe. Iz dijagrama vidimo da je najveća temperatura predgrijavanja potrebna u slučaju (C) – $d = 30$ [mm]; $Q = 1$ [kJ/mm] i iznosi 98 °C.

Na slici 26 u dijagramu je prikazana ovisnost promjene temperature predgrijavanja o debljini radnog komada i unosu topline za čelik API 5L X80.



Slika 26 Ovisnost temperature predgrijavanja o faktorima (d i Q) za API 5L X80.

Usporedbom ovog dijagrama s prethodnim uočavamo skoro isti iznos temperatura predgrijavanja za svaki postupak. Razlog tome leži u skoro istom kemijskom sastavu čelika X70 i X80.

Tako ni ovdje predgrijavanje nije potrebno za MAG postupak, osim u slučaju (C), dok je za REL s bazičnom oblogom predgrijavanje potrebno za slučajeve (C) i (D).

Za FCAW postupak s rutilnim praškom predgrijavanje je potrebno u svim slučajevima. Razlog većeg iznosa temperature predgrijavanja u odnosu na MAG i REL postupak je u tome

što postupkom FCAW unosimo najveću količinu vodika u zavar. Najveća temperatura predgrijavanja je u slučaju (C) i iznosi 94,23 °C dok za X70 ona iznosi 97,90 °C.

8. ZAKLJUČAK

Nakon proučavanja literature i provedenog analitičkog eksperimenta moguće je zaključiti sljedeće:

- FCAW postupak s rutilnim praškom zahtjeva najveću temperaturu predgrijavanja što je bilo i za očekivati s obzirom na najveći unos vodika u metal zavora. Usporedbom slučaja (C) – $d = 30$ [mm]; $Q = 1$ [kJ/mm] i (D) – $d = 30$ [mm]; $Q = 3$ [kJ/mm], vidljivo je da je u slučaju (D) potrebna manja temperatura predgrijavanja. Razlog tome je taj što u slučaju (D) imamo veći unos topline u metal zavora, odnosno koristimo veću struju i napon zavarivanja dok je brzina zavarivanja manja. Veći unos topline može značiti i zavarivanje u više prolaza što daje povoljnu sitnozrnatu mikrostrukturu, baš kao što i navodi literatura [15]. Naime, kod višeslojnog zavarivanja svaki naredni sloj odžari-normalizira, bar djelomično sloj ispod, što povoljno djeluje na nosivost spoja, dok zavori u jednom prolazu imaju relativno grubu kristalnu strukturu.
- REL postupak zavarivanja s bazičnom elektrodom zahtjeva predgrijavanje samo u slučajevima (C) i (D). Razlog višoj temperaturi predgrijavanja u slučaju (C) je manji unos topline u konstrukciju nego u slučaju (D).
- Za MAG postupak zavarivanja konstrukciju nije potrebno predgrijati osim u slučaju (C). Razlog tome je mala količina difundiranog vodika koji ulazi u metal zavora.

Gledano dobivene rezultate može se zaključiti da je najbolji postupak zavarivanja visokočvrstih čelika MAG postupak zavarivanja, odnosno postupak zavarivanja punom žicom bez obloge. Međutim, poznato je da se radi o velikom uređaju težine nekoliko desetaka kilograma koji ne može pristupiti svakom mjestu. U tim situacijama kada nije moguće koristiti MAG postupak zavarivanja odabire se REL postupak s bazičnom oblogom čiji je uređaj puno manjih dimenzija od MAG-a.

FCAW postupak s rutilnim praškom nastoji se izbjeći jer predgrijavanje dodatno povećava ukupni trošak zavarivanja.

9. POPIS LITERATURE

- [1] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [2] Ivušić V., Franz M., Španiček Đ., Ćurković L.: Materijali I, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [3] Kuzman V.: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [4] Krumes D., Novosel M.: Posebni čelici, Sveučilište u Osijeku - Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 1998.
- [5] Stupnišek M., Cajner F.: Osnove toplinske obrade metala, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [6] Math M.: Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [7] Barun T.: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [8] Garašić I.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Zavarljivost materijala“, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [9] Sikirić V., Kralj S.: Zavarljivost visokočvrstih čelika, Zavarivanje 45 (2001), Broj časopisa ³/₄, 91-96, 2001.
- [10] Tomić T.: Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [11] Garašić I.: Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [12] Kudumović D.: Zavarivanje i termička obrada, 1997.
- [13] Kralj S., Andrić Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [14] Rašić D.: Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.

- [15] Samardžić I.: Analiza tehnološkičnosti zavarenih konstrukcija – digitalni udžbenik, Sveučilište u Osijeku – Strojarski fakultet, Slavonski Brod
- [16] Decker, Karl - Heinz: Elementi strojeva, Tehnička knjiga, Zagreb, 2006.
- [17] Mišina N., Oršučić N., Polajnar I.: Zavarljivost mikrolegiranih poboljšanih čelika rabljenih u brodogradnji, Znanstveni članak, 2003.
- [18] Juraga I., Ljubić K., Živčić M.: Pogreške u zavarenim spojevima, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2007
- [19] Kralj S., Samardžić I.: Pregled metoda ispitivanja sklonosti prema nastanku hladnih pukotina, Zavarivanje 35, 5-6, 199-208, 1992.
- [20] Kralj S., Dunder M.: Ispitivanje sklonosti zavarenih spojeva čelika 25CrMo4 i Ck45 prema nastajanju hladnih pukotina, Zavarivanje 43 ½ 5-16, 2000.
- [21] Kralj S., Garašić I., Kožuh Z., Radošević B.: Prednosti automatskog zavarivanja pri izgradnji cjevovoda, Podloge iz kolegija „Strojevi i oprema za zavarivanje“, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [22]: HRN EN 1011-2: Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - 2. dio: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika (EN 1011-2:2001)